

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Desarrollo de sensores con cavidad láser de fibra óptica



Grado en Ingeniería
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Nombre y apellidos del autor: Angie Tatiana Torres Betancourt

Nombre y apellidos del director/es: Silvia Díaz Lucas

Pamplona, 3 de junio de 2021

**“La cosa más bella que podemos experimentar es lo misterioso. Es la fuente de
toda verdad y ciencia”**

Albert Einstein

RESUMEN

En este trabajo de fin de grado se presenta una estructura sensora, en base a la unión de un láser de cavidad en anillo y un sensor interferométrico. Mediante diferentes dispositivos software y hardware se ha conseguido estudiar la estabilidad en potencia de la configuración láser en anillo a diferentes cambios de temperatura.

La estructura láser utiliza una fibra de erbio que genera un pico a 1550nm a la que se le acopla dos tipos de sensores diferentes. En primer lugar, se realizaron pruebas con una estructura SMS analizando sus cambios frente a índices de refracción.

Por otro lado, se ha estudiado el comportamiento de otro sensor basado en fibra hueca, el que fue sometido a variaciones de temperatura. Como resultado, este último ha permitido obtener valores de sensibilidad de hasta 30 nm/°C, lo cual se considera valores muy altos comparados con otros tipos de sensores.

Esta estructura basada en fibra hueca es una estructura muy versátil que permite además de la medición de temperatura, medir coeficientes de dilatación de metales, tensiones, vibraciones, etc. por otro lado, gracias a la alta amplificación de la cavidad láser y a su configuración, se podría conseguir una multiplexación de múltiples sensores.

Palabras claves: Sensores de fibra óptica, amplificación láser, fibra hueca, sensor de temperatura, fibra de erbio.

PREÁMBULO

Este proyecto de fin de carrera ha sido realizado por Angie Tatiana Torres Betancourt, estudiante de Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación de la Universidad Pública de Navarra (UPNA) en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación (ETSIIT).

Seleccioné el tema de “Desarrollo de sensores con cavidad láser de fibra óptica” propuesto por el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Comunicación (DIEEC), en el grupo de Sensores de fibra óptica.

Los más importantes objetivos que se persiguen en este TFG se relacionan con el análisis de señales ópticas.

A fin de lograr nuestro objetivo, el DIEEC ha puesto a mi disposición varios equipos, software y servicios para trabajar en mi TFG. En cuanto el sistema experimental, con el que he estado trabajando, se explicará con precisión en próximos capítulos.

LISTA DE TÉRMINOS UTILIZADOS

- WDM (Wavelength Division Multiplexor) = Multiplexor por division en longitud de onda
- OFS (Optical Fiber Sensors) = Sensores de fibra óptica
- LASER (Ligth Amplication by Stimulated Emission of Radiation) = Amplificación de luz por emisión estimulada
- SMF (Single-Mode Fiber) = Fibra óptica monomodo
- MMF (Multi-Mode Fiber) = Fibra óptica multimodo
- SMS (Singlemode-Multimode-Singlemode) = Monomodo-multimodo-monomodo
- HCF (Hollow Core Fiber) = Fibra de núcleo hueco
- NC (No-Core) = Fibra de solo núcleo
- HF (Hydrogen Fluoride) = Ácido Fluorhídrico
- PID (Proportional-Integrate-Derivate) = Proporcional, integral y derivativo
- IR = Índice de refracción
- OD (Outside Diameter) = Diámetro exterior
- ID (Inside Diameter) = Diámetro interior
- TFG = Trabajo de fin de grado
- SLED (Superficial Light Emitting Diode) = LED de emisión superficial

LISTA DE FIGURAS

FIG 1) Bandas del espectro electromagnético.....	11
FIG 2) Niveles energéticos en un material.....	12
FIG 3) Fenómeno de absorción.....	13
FIG 4) Fenómeno de emisión espontánea.....	13
FIG 5) Fenómeno de emisión estimulada.....	14
FIG 6) Láser de cavidad lineal.	18
FIG 7) Configuración base de un láser de cavidad en anillo con fibra dopada con erbio.	19
FIG 8) Esquema de un multiplexor por división en longitud de onda.....	20
FIG 9) Niveles de energía del erbio.....	21
FIG 10) Esquema de un circulador óptico de tres puertos.....	21
FIG 11) Esquema de un acoplador de 2x2 vs Acoplador NxM.....	22
FIG 12) Esquema representativo de una fibra óptica (MMF/SMF).....	23
FIG 13) Esquema representativo de una fibra de núcleo hueco (HCF).....	24
FIG 14) Clasificación de los sensores de fibra óptica, a) sensor extrínseco, b) sensor intrínseco.	25
FIG 15) Interferencia de ondas, a) constructiva, b) destructiva.....	26
FIG 16) Esquema representativo del interferómetro de Michaelson.....	27
FIG 17) Esquema representativo del interferómetro de Fabry-Perot.....	27
FIG 18) Setup experimental de trabajo con SMS, a) Conexión de referencia de la fuente de luz, b) conexión de la SMS.	28
FIG 19) Espectros observados en el OSA con la fuente de luz 4-SLED, a) Referencia, b) SMS de 60mm.....	29
FIG 20) Espectros de las tres configuraciones de SMS creadas, a) de 15 mm de fibra MMF, b) de 30 mm de fibra MMF, c) de 60 mm de fibra MMF.....	30
FIG 21) Desplazamiento del espectro de una estructura SMS al variar el índice de refracción.....	31
FIG 22) Imagen de la sección SMS de 67 mm después del etching.....	32
FIG 23) Desplazamiento del espectro de una estructura SMS de 67 mm al variar el índice de refracción.....	32
FIG 24) Configuración experimental del sistema en anillo del láser a) Conexión de referencia b) Conexión con SMS insertada.....	33
FIG 25) Espectro del láser con la SMS en transmisión a 1530 a) espectros del bombeo y la amplificación del Erblio, b) espectro resultante de la inserción de la SMS.....	34
FIG 26) Estabilidad en potencia y en longitud de onda de la SMS insertada.....	34
FIG 27) Espectro del láser con la SMS en transmisión a 1530 variando el índice de refracción externo.	35
FIG 28) Explicación teórica de la variación de potencia con el índice de refracción.	35
FIG 29) Espectro del anillo con SMS insertada antes (espectro rojo), y después del etching (espectro azul).	36
FIG 30) Imagen de la sección SMS de 60 mm después del etching.....	36
FIG 31) Vista de pájaro del proceso de etching de la SMS 60 mm.	37
FIG 32) Espectro de la SMS antes (espectro rojo), y después del etching (espectro azul).	38
FIG 33) Imagen de la sección SMS de 1 mm después del etching.....	38

FIG 34) Gráfico de cambio de Potencia y Longitud de onda con la temperatura de todo el espectro.	38
FIG 35) Gráfico de cambio de Potencia y Longitud de onda con la temperatura, de los dos picos por separado.....	39
FIG 36) Setup utilizado como cavidad en anillo con interferometría en reflexión.	40
FIG 37) Imagen del microscopio de la fibra no core utilizada como espejo, a) Zona sin etching, b) Zona con etching y c) Zona con etching después de depositar el espejo de plata.	41
FIG 38) Imagen del microscopio de fibra sensor, a) Imagen completa del sensor donde aparecen las tres fibras (SMF-HC-NC) y b) Imagen ampliada donde se aprecia la longitud de la cavidad hueca.	41
FIG 39) Espectros de transmisión resultantes del proceso de fabricación del sensor. En azul se muestra el espectro inicial a mayor distancia entre la fibra espejo y la SMF. El espectro final se muestra en color morado.	42
FIG 40) Espectro final de transmisión resultante de la interferometría generada a una distancia de 34 μm entre la fibra espejo y la SMF.	42
FIG 41) Configuración del controlador de temperatura PID, a) Conexiones eléctricas, b) Imagen del software controlador.	43
FIG 42) Gráfica de variación del espectro de la señal de interferometría al variar la temperatura.....	44
FIG 43) Gráfica del desplazamiento de la longitud de onda al variar la temperatura de 20°C a 24°C en escalones de 1°C.	44
FIG 44) Gráfica de variación de longitud de onda con respecto a la temperatura.	44
FIG 45) Gráfica de variación del espectro de la señal de interferometría al variar la temperatura.....	45
FIG 46) Gráfica del desplazamiento de la longitud de onda al variar la temperatura en saltos de 20°C a 22°C.....	45
FIG 47) Cámara climática utilizada para los cambios de temperatura a) Imagen de la cámara climática, b) Imagen del software controlador.	46
FIG 48) Gráfica del desplazamiento de la longitud de onda al variar la temperatura de 21°C a 25°C en escalones de 1°C.	47
FIG 49) Gráfica de variación de longitud de onda con respecto a la temperatura	47
FIG 50) Gráfica del desplazamiento de la longitud de onda al variar la temperatura en saltos de 20°C a 2 °C.	48

ÍNDICE

RESUMEN	2
PREÁMBULO	3
LISTA DE TÉRMINOS UTILIZADOS	4
LISTA DE FIGURAS.....	5
1 INTRODUCCIÓN	9
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
2.1 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	11
2.1.1 Mecanismo de interacción radiación-materia.	12
2.1.2 Láser: Definición, funcionamiento y características.	17
2.1.3 Tipos de láser	18
2.2 ELEMENTOS ÓPTICOS EN LA ESTRUCTURA LÁSER.....	20
2.2.1 Sistema de bombeo óptico	20
2.2.2 Multiplexor por división en longitud de onda (WDM)	20
2.2.3 Fibra dopada con erbio	20
2.2.4 Circulador óptico	21
2.2.5 Acoplador óptico.....	22
2.3 SENSORES BASADOS EN FIBRA ÓPTICA.....	22
2.3.1 Fibra óptica	22
2.3.1.1 Fibra óptica monomodo	23
2.3.1.2 Fibra óptica multimodo.....	23
2.3.1.3 Fibra de núcleo hueco.....	23
2.3.2 Clasificación de un sensor basado en fibra óptica.....	24
2.3.2.1 Sensores extrínsecos.....	25
2.3.2.2 Sensores intrínsecos	25
2.4 FENÓMENO DE LA INTERFEROMETRÍA	26
3 EXPERIMENTOS.....	28
3.1 Análisis del comportamiento de una fibra monomodo-multimodo-monomodo (SMS) según la longitud.	28
3.2 Análisis del comportamiento de una fibra SMS de longitud 60 mm frente a los cambios del índice de refracción.	31
3.3 Análisis del comportamiento de una fibra E-SMS de longitud 67 mm frente a los cambios del índice de refracción.	32
3.4 Cavidad en anillo con SMS en reflexión	33
3.4.1 Estudio de láser en anillo con SMS de 60 mm en transmisión.....	33

Desarrollo de sensores con cavidad láser de fibra óptica

3.4.2	Estudio de láser en anillo con SMS de 60 mm en transmisión variando el índice de refracción (IR).	35
3.4.3	Estudio de láser en anillo con SMS de 60mm en transmisión (etching 60 mm).	36
3.4.4	Análisis del comportamiento de una fibra SMS de 60mm tras el proceso de ataque químico con HF (etching de 1 mm de longitud)	37
3.4.5	Estudio de la estabilidad de la configuración en anillo con SMS insertada (etching 1mm).	38
3.5	Cavidad en anillo con interferometría en reflexión	40
3.5.1	Proceso de fabricación	40
3.5.2	Estudio de la estabilidad en temperatura del sensor en reflexión (I)	43
3.5.2.1	Mecanismo de regulación de temperatura.	43
3.5.2.2	Resultados obtenidos	43
3.5.3	Estudio de la estabilidad en temperatura del sensor en reflexión (II)	46
3.5.3.1	Mecanismo de regulación de temperatura.	46
3.5.3.2	Resultados obtenidos	46
4	CONCLUSIONES	48
5	BILBIOGRAFÍA	49
6	ANEXOS	51
6.1	Especificaciones del láser de bombeo (976nm 300mW)	51
6.2	Especificaciones del divisor en longitud de onda	55
6.3	Especificaciones de la fibra dopada con erbio	57
6.4	Especificaciones del circulador óptico	58
6.5	Especificaciones del acoplador óptico 50:50	59
6.6	Especificaciones de la fibra de núcleo hueco	59
6.7	Especificaciones de la fibra de no-core	60

1 INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones ópticas son la principal aplicación de la fibra óptica. Sin embargo, hay un segundo dominio en el que se puede utilizar esta estructura: los sensores. Los sensores de fibra óptica (OFS) se pueden clasificar de muchas formas diferentes.

Los sensores de fibra interferométrica surgieron en la década de 1970, siendo el giroscopo de fibra óptica el más exitoso de ellos. El principio básico suponía la luz de un láser que se dividía por un divisor de haz y entraba en la fibra por ambos extremos. Ambos haces salen de la fibra y un fotodetector los recibe. Gracias al efecto Sagnac, ambos haces interfieren constructiva y destructivamente dependiendo de la velocidad de rotación del dispositivo [1].

En este sentido, es importante considerar las ventajas y desventajas de la fibra óptica. Los principales puntos positivos de la fibra óptica son [2] [3]:

- Tamaño pequeño y ligero.
- Bajas pérdidas, que permiten la medición a distancia.
- Inmunidad a la interferencia electromagnética y de radiofrecuencia.
- No se requiere polarización eléctrica para guiar la luz, por lo que los sensores resultantes son pasivos, lo cual es muy relevante en entornos con riesgo de explosión.
- Alto ancho de banda, que permite la multiplexación y la detección de múltiples parámetros.
- Detección distribuida en líneas de comunicación de fibra óptica: es posible desarrollar técnicas de modulación que permitan medir cantidades físicas a lo largo de la propia fibra.

Sin embargo, también existen preocupaciones importantes [3], que se van resolviendo progresivamente con el desarrollo de la tecnología:

- Costo.
- Complejidad en los sistemas de interrogación.
- Desconocimiento del usuario final con la tecnología.

Con la fibra óptica es posible realizar mediciones distribuidas en distancias de hasta varias decenas de kilómetros, una capacidad que es exclusiva de ésta. Dado su pequeño tamaño permite ser empotrada en túneles, puentes o construcciones de

hormigón [4], [5], y una vez instalada, el costo inicial se compensa con un monitoreo continuo de variables, como tensión, temperatura o vibración.

Sin embargo, para las mediciones a largas distancias se necesitan fuentes de luz de una alta potencia. Estas fuentes son diseñadas a base de láseres.

Un láser emite luz en forma de ondas paralelas, todas ellas a una misma longitud de onda, (se trata de luz monocromática). Las ondas electromagnéticas que componen el haz de luz marchan al paso y por ello, se dice que el láser emite luz coherente. La palabra LASER corresponde al acrónimo de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, que traducido sería Amplificación de luz mediante emisión estimulada, y fue producto de la teoría fotoeléctrica de Albert Einstein.

Por otro lado, la emisión estimulada permite una gran amplificación de la luz, por tanto, se considera que el haz de luz es de alta intensidad; y al tener un espectro muy estrecho, es decir, al ser muy directivo, se considera como una herramienta de gran precisión [6].

Una de las estructuras más utilizadas para la ocurrencia de emisión estimulada es una cavidad láser en anillo donde el material encargado de la amplificación es erbio.

En este TFG se presenta el desarrollo de varios tipos de estructuras sensoras basadas en fibra óptica y combinadas con una fuente de luz basada en un láser de cavidad en anillo utilizando el erbio como elemento amplificador.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este segundo apartado se realizará una descripción sobre los fundamentos teóricos para entender el funcionamiento de los dispositivos, y estructuras utilizadas durante el desarrollo del trabajo de fin de estudios. En primera instancia se abordará la radiación electromagnética, para posteriormente entrar en la amplificación óptica por emisión estimulada, la cual constituye el fundamento de funcionamiento del láser. En una segunda parte se hablará de los tipos de fibra, dispositivos ópticos y el fenómeno de la interferometría, para poder entender el funcionamiento de las estructuras desarrolladas en este trabajo.

2.1 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Las formas de radiación electromagnética componen un espectro continuo que va de menos a más energía, conforme se aumenta en frecuencia y se disminuye en longitud de onda, la energía aumenta.

Las bandas de energía del espectro electromagnético se dividen en: ondas de radio, microondas, luz infrarroja, luz visible, luz ultravioleta, Rayos X, rayos gamma y rayos cósmicos [6], [7]. Las ondas electromagnéticas tienen una naturaleza dual, es decir, se puede ver la radiación como partículas discretas, fotones, caracterizados por su energía; o también, se puede ver como ondas discretas por su longitud y fase.

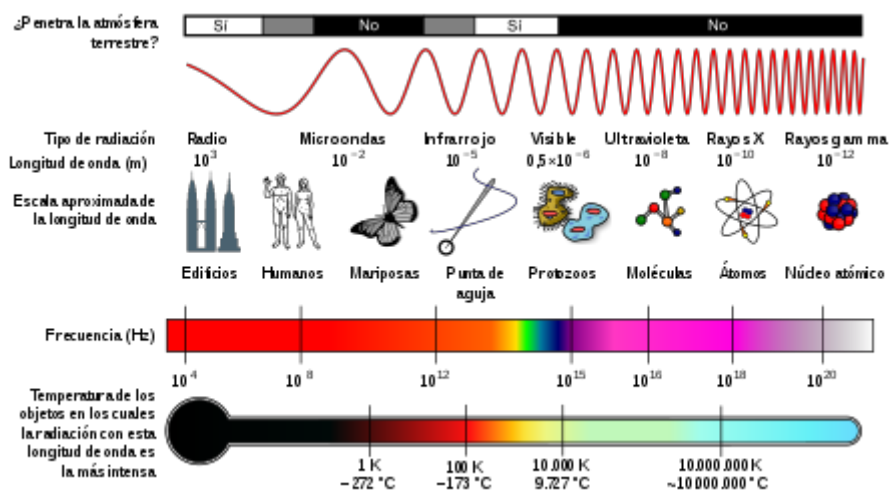


FIG 1) Bandas del espectro electromagnético.

En comunicaciones ópticas se suele trabajar en la zona infrarroja, la cual se divide en 3 ventanas de transmisión centradas en 850 nm (1ª ventana), 1310 nm (2ª ventana) y 1550 nm (3ª ventana) [8], [9].

2.1.1 Mecanismo de interacción radiación-materia.

Los átomos que componen la materia son microscópicos; sus tamaños típicos están alrededor de 100 pm y las partes que lo componen son el núcleo, donde se encuentran protones y neutrones, y los orbitales de distinta energía cargados con electrones. El electrón pasa de un nivel de energía a otro emitiendo o absorbiendo un fotón, unidad mínima de luz la cual no posee masa.

En el año 1917, Einstein relacionó por primera vez la luz con la materia. Concluyó que el campo electromagnético interacciona con la materia en forma de procesos, a los que denominó **absorción**, **emisión espontánea** y **emisión estimulada**.

Para comprender estos tres fenómenos se deben entender los niveles de energía de la materia. La teoría cuántica establece que las partículas en la materia tienen distintos niveles de energía. Los niveles de energía, E1 y E2, se corresponden con dos niveles de energía contiguos; N1 y N2, es la población de electrones con energía E1 y E2 respectivamente.



FIG 2) Niveles energéticos en un material

Cuando la materia se encuentra en estado de reposo, sus átomos poseen electrones ocupando el nivel energético E1, también denominado estado fundamental.

Cuando un fotón o campo electromagnético incide sobre la materia en estado de reposo suministrándole una energía igual a la diferencia entre los dos niveles, E1 y E2, provoca una excitación. Dicha energía es expresada como:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1)$$

Donde “h” es la constante de Planck con un valor de $h = 6.63 \times 10^{-34}$ Joules, y “v” es la frecuencia a la cual el fotón u onda electromagnética incide. Por otro lado, la excitación, hace que el fotón u onda, sea absorbido por el material provocando una

transición de un electrón de la banda de valencia, E1, a la banda de conducción, E2. Este proceso de excitación se denomina fenómeno de **absorción** y no produce luz, sino que la consume.

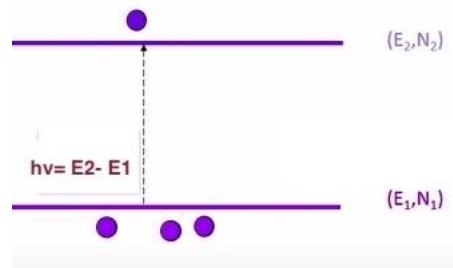


FIG 3) Fenómeno de absorción

De hecho, el campo electromagnético a su paso por un material, como consecuencia de la absorción, ve reducida su potencia. La tasa de absorción, R_{abs} , podemos calcularla como la variación temporal de la población en el nivel más bajo (Ecu. 2). Dicha tasa, será proporcional a la población en el nivel inferior, N_1 , y también a la densidad espectral de la radiación electromagnética presente, $\rho(\nu)$. La constante de proporcionalidad es el coeficiente de Einstein de absorción llamado B_{12} .

Mecanismo de interacción de radiación (I) $R_{abs} = \frac{dN_1}{dt} = B_{12} \times N_1 \times \rho(\nu)$ (2)

Tras un cierto período de tiempo, el átomo tiende a volver a su estado inicial de reposo, y de esta manera, de forma espontánea, un electrón sufre una transición del nivel de energía E2 al nivel de energía E1, liberando así la misma energía que hizo que el material, durante el proceso de absorción, se excitara. La energía liberada en forma de fotón o radiación electromagnética desestimula el material. A este proceso se le llama **emisión espontánea**.

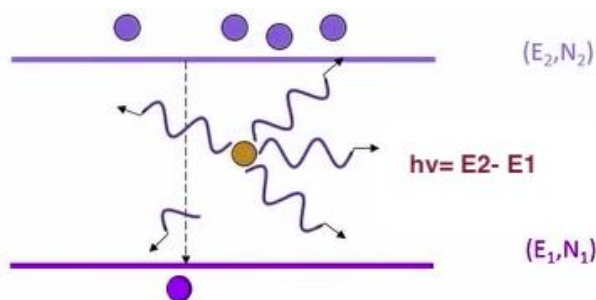


FIG 4) Fenómeno de emisión espontánea

Este proceso es espontáneo y, por tanto, aleatorio. La dirección de emisión del fotón es totalmente arbitraria y la fase del campo electromagnético también lo es. Estamos ante radiación no coherente y podemos calcular la tasa de emisión espontánea, R_{spont} , como la variación temporal de la población en el nivel E2 debido a emisión espontánea (Ecu. 3). Dicha tasa, será proporcional a la población en el nivel más alto, N_2 , y la constante de proporcionalidad, A , es el coeficiente de Einstein de emisión espontánea.

Mecanismo de interacción de radiación (II) $R_{spont} = \frac{dN_2}{dt}|_{spont} = A \times N_2$ (3)

La absorción y la emisión espontánea son dos procesos que se suceden continuamente en la interacción luz-materia y el período de tiempo que dura el átomo excitado antes de perder la misma energía que lo excitó y volver al estado de reposo se denomina el tiempo de vida de emisión espontánea τ_2 .

Finalmente, Einstein describió un último proceso denominado **emisión estimulada** que dice que si nos fijamos en las partículas del nivel más alto y observamos la presencia de un campo electromagnético o un número de fotones cuya energía es igual a la diferencia de energía entre niveles, ocurre lo siguiente: la presencia de estos fotones estimula las transiciones del nivel energético más alto al nivel más bajo con la consecuente liberación de energía igual a la diferencia entre niveles.

Como resultado de la emisión estimulada aparece un nuevo fotón con características similares al fotón incidente.

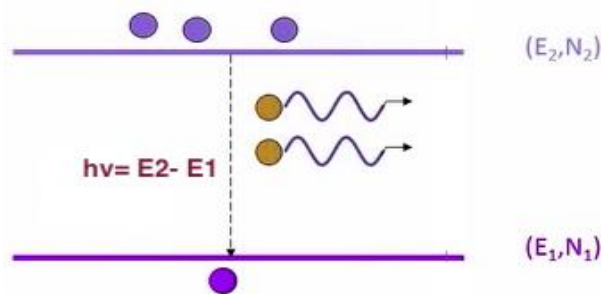


FIG 5) Fenómeno de emisión estimulada

La radiación generada por emisión estimulada es coherente, el fotón generado tiene la misma fase que el fotón incidente; además, tienen la misma frecuencia o energía y ambos tendrán también la misma dirección, lo que supone que la luz generada por emisión estimulada tendrá propiedades de confinamiento. Así mismo, el estado de polarización del fotón generado será el mismo que el del fotón incidente.

En este caso, la tasa de emisión estimulada, R_{stm} , se puede calcular como la variación temporal de la población en el nivel más alto, N_2 , debido emisión estimulada (Ecu. 4). Dicha tasa será proporcional a la población en el nivel más alto, N_2 , y también, a la densidad espectral de la radiación electromagnética presente para que ocurra este fenómeno. La constante de proporcionalidad es el coeficiente de Einstein de emisión estimulada llamado B_{21} .

Mecanismo de interacción de radiación (III) $R_{stm} = \frac{dN_2}{dt}|_{stm} = B_{21} \times N_2 \times \rho(v)$ (4)

En un material en equilibrio termodinámico, el número de partículas en el nivel más alto y en el nivel más bajo se mantienen constantes, lo que supone que el total de transiciones de arriba abajo y de abajo arriba deben ser constantes. Esto escrito en función de las tasas (relaciones de Einstein en equilibrio):

$$R_{stm} + R_{spon} = R_{abs} \quad (5)$$

$$\frac{dN_2}{dt}|_{stm} + \frac{dN_2}{dt}|_{spon} = \frac{dN_1}{dt} \quad (6)$$

$$B_{21} \times N_2 \times \rho(v) + A \times N_2 = B_{12} \times N_1 \times \rho(v) \quad (7)$$

Por un lado, partiendo de la condición de equilibrio termodinámico se puede obtener la relación entre las poblaciones del nivel 1 y del nivel 2 (Ecu. 8).

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{B_{12} \times \rho(v)}{B_{21} \times \rho(v) + A} \quad (8)$$

Por otro lado, la **estadística de Boltzman** dice cual es la población de electrones en equilibrio con energía E , es decir, $N(E)$. La siguiente fórmula, (Ecu. 9), indica que esta población de electrones en el nivel de energía, E , viene dado por la exponencial elevado a menos ΔE dividida entre KT , donde “ K ” es la constante de Boltzman con un valor de $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K, y “ T ” es la temperatura.

$$N(E) = e^{-\frac{\Delta E}{KT}} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{KT}} = e^{-\frac{h\nu}{KT}} \quad (9)$$

En la anterior fórmula podemos observar que niveles con mayor energía tendrán poblaciones menores en equilibrio.

La estadística de Boltzman nos permite obtener la relación de las poblaciones en el nivel 1 y en el nivel 2 como se muestra en la Ecu. 10:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_1}{g_2} e^{-\frac{hf}{kT}} \quad (10)$$

Se puede observar que a mayor temperatura hay más probabilidad de encontrar átomos excitados; g_1 y g_2 son parámetros dependientes de la degeneración de los subniveles.

Volviendo a la expresión de equilibrio termodinámico (relaciones de Einstein en equilibrio, Ecu. 11):

$$B_{21} \times N_2 \times \rho(v) + A \times N_2 = B_{12} \times N_1 \times \rho(v) \quad (11)$$

Despejando la densidad de radiación electromagnética:

$$B_{21} \times N_2 \times \rho(v) - B_{12} \times N_1 \times \rho(v) = -A \times N_2 \quad (12)$$

$$\rho(v) = \frac{-A \times N_2}{B_{21} \times N_2 - B_{12} \times N_1} \quad (13)$$

$$\rho(v) = \frac{A}{B_{12} \times \frac{N_1}{N_2} - B_{21}} \quad (14)$$

$$\rho(v) = \frac{\frac{A}{B_{21}}}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \times \frac{N_1}{N_2} - 1} \quad (15)$$

Expresión obtenida de las tasas correspondientes a los 3 fenómenos en equilibrio termodinámico (Ecu. 15).

Si se toma como ejemplo la radiación de un cuerpo negro, el cual es capaz de absorber toda la radiación que le llega y no reflejar absolutamente nada; la radiación electromagnética emitida por un este se debe únicamente a la temperatura y es conocida por la siguiente expresión:

Planck: radiación emitida por un sistema atómico en equilibrio $\rho(v) = \frac{\frac{8\pi hf^3}{c^3}}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \quad (16)$

Comparando las dos expresiones anteriores de densidad de radiación electromagnética:

$$\frac{A}{B_{21}} = \frac{8\pi hf^3}{c^3} \quad \text{Planck} \quad (17)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{g_1}{g_2} e^{\frac{hf}{kT}} \quad \text{Boltzman} \quad (18)$$

$$\frac{B_{12}}{B_{21}} = \frac{g_2}{g_1} \quad (19)$$

Por tanto, Einstein, gracias a Boltzman y a Planck pudo despejar los coeficientes A , B_{12} y B_{21} .

A partir de esta comprobación anterior se puede calcular la relación existente entre la tasa de emisión espontánea y la tasa de emisión estimulada (Ecu. 20).

$$\frac{R_{stm}}{R_{spon}} = \frac{B_{21} \times N_2 \times \rho(v)}{A \times N_2} = \frac{B_{21}}{A} \times \rho(v) = \frac{c^3}{8\pi h f^3} \times \frac{8\pi h f^3}{c^3} \times \frac{1}{e^{\frac{hf}{KT}} - 1} \rightarrow \frac{R_{spon}}{R_{stm}} = e^{\frac{hf}{KT}} - 1 \quad (20)$$

Finalmente, se concluye en que dicha relación es una función de la frecuencia y de la temperatura. Ejemplo:

$$\begin{array}{ll} T=298^\circ & KT = 25\text{meV} \\ \lambda = 1\mu m & hf = h \times \frac{c}{\lambda} = 1.42 \text{ eV} \\ hf \gg KT & R_{spon} \gg R_{stm} \end{array}$$

Con todo esto, llegamos a la conclusión de que la emisión espontánea es dominante. Para invertir dicha situación hay que romper dicho equilibrio, para lo cual es necesario $N_2 \gg N_1$, condición que se conoce como **inversión de población**.

2.1.2 Láser: Definición, funcionamiento y características.

Las partes fundamentales del láser son: el **medio activo**, dónde se encuentra la población invertida de electrones, **la cavidad láser o resonador**, que junto con el medio activo proporcionan la amplificación del haz de luz, y el **sistema de bombeo**, el cual suministra la energía al medio activo para conservar la inversión de población.

El medio activo está compuesto por átomos en estado sólido, líquido o gaseoso. Para que el láser emita luz se debe excitar el medio activo de alguna manera, trabajo que es cometido por el bombeo. Gracias a este la probabilidad de encontrar electrones en estado excitado dentro del medio activo es mayor, es decir que, permite la inversión de población, proceso que provoca el fenómeno de emisión estimulada, gracias a la cual se amplifica la luz en forma de ondas coherentes y monocromáticas.

En este trabajo el medio activo es la fibra dopada con Erblio. La luz absorbida por el medio generará más luz, pero a una longitud de onda de 1550 nm (diferente a la del bombeo de 980nm).

Por otro lado, la amplificación en lazo abierto a través de un medio activo no es suficiente para producir energía útil en un láser. La cavidad láser o resonador constituye un elemento fundamental en el láser porque al tener realimentación positiva, le permite

generar un alto flujo de fotones en el medio activo, dando lugar a un mayor número de transiciones radioactivas y un mayor nivel de amplificación por emisión estimulada.

2.1.3 Tipos de láser

Existen dos tipos de láser, los láseres de cavidad lineal y los láseres en anillo. A continuación se explica en detalle el funcionamiento de ambos.

Láser de cavidad lineal:

El láser Fabry-Perot es el resonador más sencillo. En este resonador, el medio activo es introducido entre dos espejos dando lugar a una estructura que deja pasar múltiples longitudes de onda equiespaciadamente. Lo que va a hacer este medio semiconductor (unión p-n) es generar muchos fotones a muchas longitudes de onda mediante emisión espontánea; el fotón aleatorio y espontáneo excitará a otro mediante emisión estimulada de modo que un fotón creará más fotones. Hay que compensar las pérdidas debidas a las reflexiones que se producen en los espejos. La luz está continuamente reflejándose en ambos espejos. Aunque no hubiera espejos hay reflexiones por el cambio de índice de refracción del medio. La sílice solo refleja un 3% o 4% de la luz que recibe.

Uno de los espejos tiene una reflexión de 100% mientras que el otro tiene una reflexión de 90-95% aprox. A través del espejo con reflexión parcial la energía sale en forma de haz de luz (salida acoplada), FIG 6).

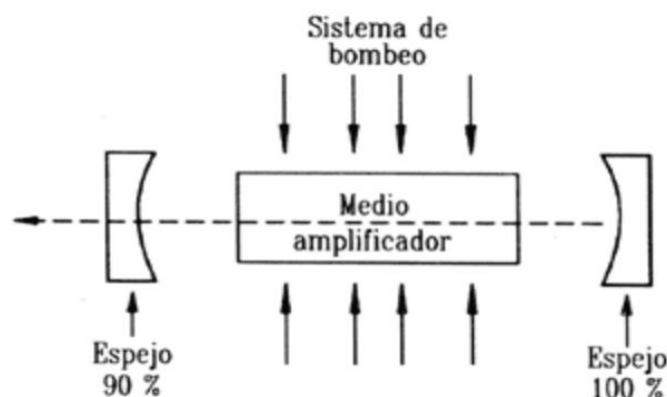


FIG 6) Láser de cavidad lineal.

Láser de cavidad en anillo:

La recirculación de la luz a través del anillo permite que la señal se amplifique pasando continuamente por el medio activo, que en este caso es la fibra dopada con

Erbio. Este proceso es similar a la que ocurriría en la cavidad lineal, en la cual la luz se amplifica al rebotar varias veces en el medio activo o amplificador.

Los elementos que constituyen principalmente el láser en anillo de fibra dopada con Erbio son FIG 7):

- El sistema de bombeo, que suele estar compuesto por un láser de alta potencia a 980nm o a 1480nm. En este caso a 980 nm.
- Un multiplexador en longitud de onda, (WDM), encargado de multiplexar las señales del bombeo y de la recirculación.
- El medio activo, que en este caso es la fibra dopada con erbio. Este tipo de fibra permite amplificación de banda ancha entorno a los 1550 nm, (tercera ventana del espectro óptico)
- Un acoplador que recibe por una de sus entradas la señal de la recirculación, por una de sus salidas permite la recirculación y por la otra, la salida final del haz de luz del láser.

La configuración del láser en anillo tiene una gran ventaja y es que, al tener un medio activo en forma de fibra óptica, la potencia confinada en el núcleo, espacio de unas pocas micras, es de una intensidad mucho más alta que si confinamos la potencia en una cavidad lineal de mayores dimensiones.

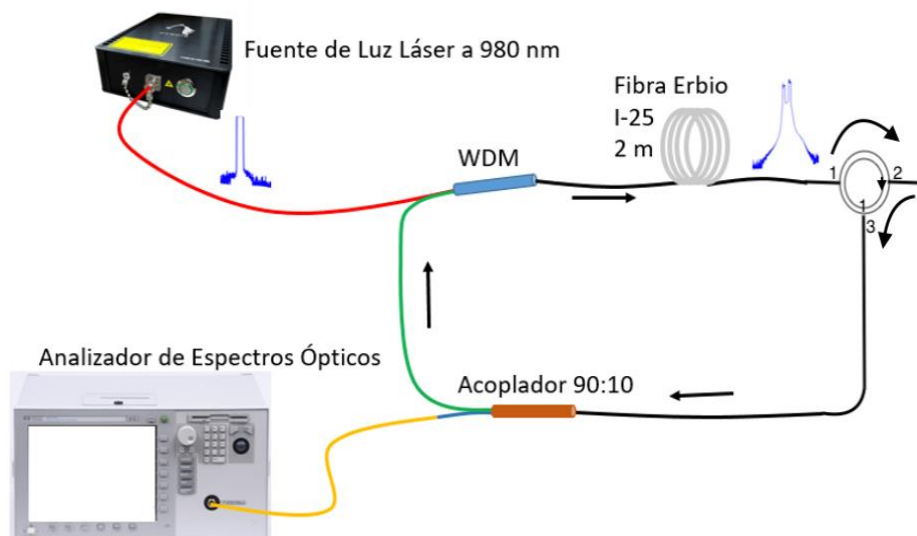


FIG 7) Configuración base de un láser de cavidad en anillo con fibra dopada con erbio.

2.2 ELEMENTOS ÓPTICOS EN LA ESTRUCTURA LÁSER

2.2.1 Sistema de bombeo óptico

Con el objetivo de proporcionar la potencia óptica de bombeo, se utiliza un láser de Pyrotech, fabricado en la propia universidad. El diodo utilizado (BL976-SAG300) es capaz de emitir una potencia óptica de 300mw. Este láser incluye un controlador de temperatura interno que permite la estabilidad de la fuente, además, tiene un espectro de emisión estrecho en torno a los 980nm.(Anexo 6.1).

2.2.2 Multiplexor por división en longitud de onda (WDM)

El dispositivo WDM, (Wavelength Division Multiplexing), realiza el proceso de combinar/multiplexar diferentes señales en una única fibra óptica.

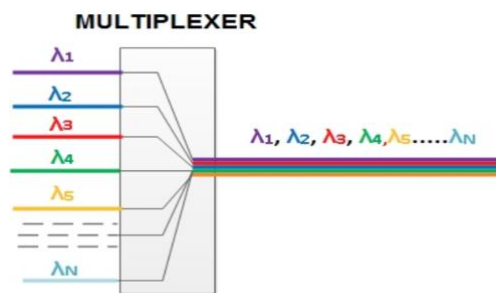


FIG 8) Esquema de un multiplexor por división en longitud de onda

El número de señales a combinar tiene que ser igual al número de entradas del dispositivo. En este trabajo se utiliza un WDM de 2 entradas, a 980 nm y a 1550 nm, las cuales son transportadas en un cierto ancho de banda y sobre portadoras distintas en un medio como la fibra óptica (Anexo 6.2).

Cabe destacar que estos dispositivos son bidireccionales, en un sentido se realiza la multiplexación y en el otro sentido la demultiplexación en longitud de onda.

2.2.3 Fibra dopada con erbio

La fibra dopada con iones de tierras raras se consigue al dopar su núcleo con elementos químicos denominados lantánidos. Los átomos de lantánidos, (erbio (Er^{3+}), tulio (Tm^{3+}), y praseodimio (Pr^{3+})), proporcionan dos niveles (niveles inferior y superior de la transición laser) entre los que se producen transiciones de absorción y emisión a una longitud de onda a la cual se quiere conseguir la amplificación. Para ello es preciso

que domine la emisión estimulada frente a la absorción y, por tanto, es necesaria la inversión de población.

El elemento lantánido más utilizado es el erbio (Er^{3+}), debido a su baja atenuación cuando se trabaja en la tercera ventana de las comunicaciones ópticas (0,2 dB/Km). Con este tipo de amplificadores se consiguen hasta 40/50 dB de ganancia (en régimen de baja señal de entrada), con potencias de bombeo moderadas (de varias decenas de mW) [11]. En la FIG 9) se muestra el diagrama de los niveles de energía del erbio y las longitudes de onda de bombeo necesarias para alcanzarlos; (hay diferentes longitudes de onda de bombeo, pero por diversos motivos las dos más utilizadas y más eficientes son: 980 y 1480 nm.) (Anexo 6.3).

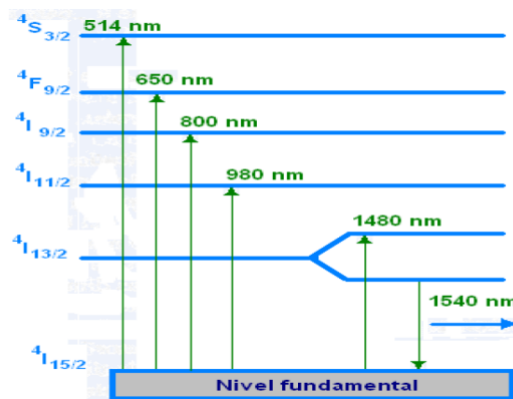


FIG 9) Niveles de energía del erbio

2.2.4 Circulador óptico

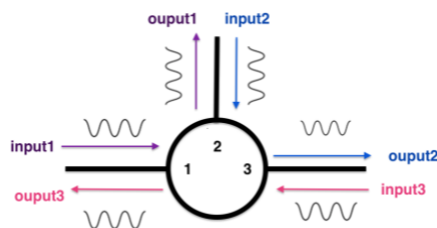


FIG 10) Esquema de un circulador óptico de tres puertos

Dispositivo óptico pasivo para pasar la luz de una fibra óptica a otra. El sentido de circulación es el mismo al que viaja la luz, la cual entra por el puerto 1 y se dirige al puerto 2 y entra por el puerto 2 y se dirige al 3 (Anexo 6.4).

2.2.5 Acoplador óptico

Sirven para distribuir múltiples señales ópticas. Dispone de N entradas (típicamente 1 o dos) y M salidas (típicamente 2, 4, 8, 16, 32,64). Introducen pérdidas de inserción (IL) aproximadamente iguales para cada una de sus ramas y también se caracterizan las pérdidas de retorno en cada puerto (RL).

Un acoplador óptico se caracteriza por la relación de acoplo, pérdidas de inserción, número de puertos entrada y salida, direccionalidad, selectividad en longitud de onda, tipo de transmisión (monomodo o multimodo), sensibilidad de la polarización y pérdidas de polarización (Anexo 6.5).

La relación de acoplo en cada una de las ramas de salida puede ser, por ejemplo, de 50:50, 70:30, 90:10.

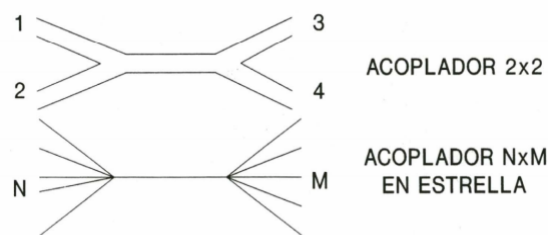


FIG 11) Esquema de un acoplador de 2x2 vs Acoplador NxM

2.3 SENSORES BASADOS EN FIBRA ÓPTICA

2.3.1 Fibra óptica

La fibra óptica fue propuesta como concepto y fabricada en los años 20, [12], aunque no fue hasta los 50 que se empezaron a utilizar recubrimientos que mejoraron notablemente sus características de guiado y estabilidad mecánica [12], [13].

Esta consiste en un filamento con forma cilíndrica, fabricado de sílice, plástico u otros materiales empleado para la transmisión de información a grandes distancias mediante señales luminosas. Principalmente es utilizada en telecomunicaciones para la transmisión de información, sin embargo, otro uso no tan difundido es su aplicación como sensores.

La fibra óptica está compuesta por un núcleo, de índice de refracción n_1 , que es por donde se guía la luz confinada, rodeado de un recubrimiento, de índice de refracción

n_2 , ligeramente menor que el del núcleo [3]. Esta diferencia de índices entre núcleo y revestimiento proporciona la condición de reflexión total interna en la frontera entre los dos materiales, necesaria para que las ondas en su interior se transmitan a lo largo de la fibra. Actualmente, sobre el recubrimiento se coloca también una cubierta plástica para proteger la fibra conocida como revestimiento primario.

En la figura 12 se representan esquemáticamente una fibra óptica.

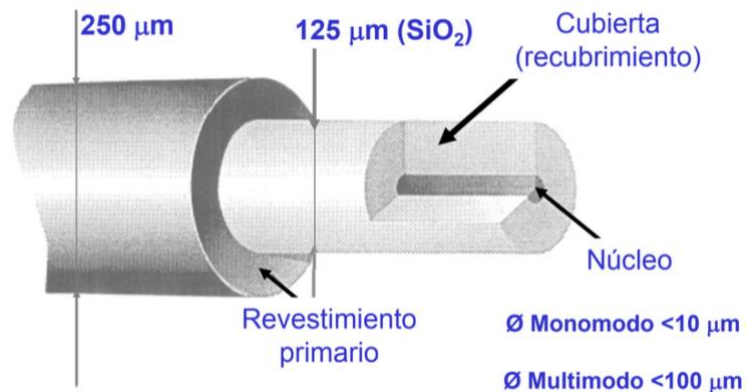


FIG 12) Esquema representativo de una fibra óptica (MMF/SMF)

2.3.1.1 Fibra óptica monomodo

Este tipo de fibra se conoce así porque por ella solo se propaga un modo de luz. Esto se debe a que el tamaño de su núcleo es menor de $10\mu\text{m}$, lo que permite alcanzar distancias mayores y tasas de transmisión más elevadas que la fibra multimodo.

La fibra monomodo SMF (Single Mode Fiber), por sus siglas en inglés, poseen un núcleo con un diámetro entre 8 y $10.5\mu\text{m}$ y un recubrimiento con un diámetro de $125\mu\text{m}$.

2.3.1.2 Fibra óptica multimodo

Es aquella en la que se propaga más de un modo. El diámetro de su núcleo es menor de $100\mu\text{m}$ (el más empleado es de $62,5\mu\text{m}$) y presenta una mayor atenuación que la fibra óptica monomodo.

Este tipo de fibras se emplean en aplicaciones de corta distancia. Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra monomodo, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de precisión.

2.3.1.3 Fibra de núcleo hueco

Las fibras ópticas de núcleo hueco (HCF) poseen un núcleo lleno de aire rodeado con un recubrimiento de vidrio microestructurado que permite un alto nivel de confinamiento de la luz.

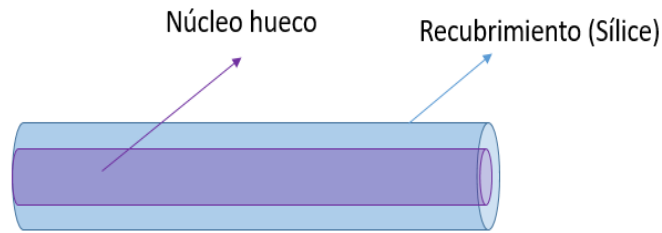


FIG 13) Esquema representativo de una fibra de núcleo hueco (HCF)

Las HCF ofrecen una no linealidad extremadamente baja e insensibilidad a la temperatura. Se pueden utilizar ventajosamente en muchas aplicaciones, por ejemplo, temperatura [14], [15], humedad relativa [16], biosensor [17], químicos [18], [19], o resonadores Fabry-Perot [15], [16]. (Anexo 6.6).

2.3.2 Clasificación de un sensor basado en fibra óptica

Los elementos básicos de un sensor de fibra óptica son una fuente de luz, ya sea un láser, un LED ("light emitting diode") o una fuente de espectro ancho; un elemento activo, para detectar la variación en la señal óptica causada por la perturbación en el sistema y un transductor (fotodetector) para facilitar el análisis convirtiendo la señal proveniente del elemento activo en otro tipo de señal, generalmente eléctrica. La fibra puede ejercer de parte activa, de manera que cambios en el entorno donde se encuentre generen cambios en sus propiedades que afecten de forma medible a la señal guiada por su interior. También puede formar parte directamente del elemento transductor al recoger y transmitir solamente los cambios que presente un elemento activo cercano a ella. Por último, también puede realizar ambas funciones a la vez, medir y transmitir.

Los sensores de fibra óptica pueden ser clasificados fundamentalmente en dos grandes campos: en base al área de medición, que los divide en sensores extrínsecos, intrínsecos; o en base a la técnica o principio óptico empleado, siendo los más utilizados los sensores basados en modulación de intensidad (IBS), los Fiber Bragg Gratings (FBG) y los interferómetros Fabry-Pérot (FPI).

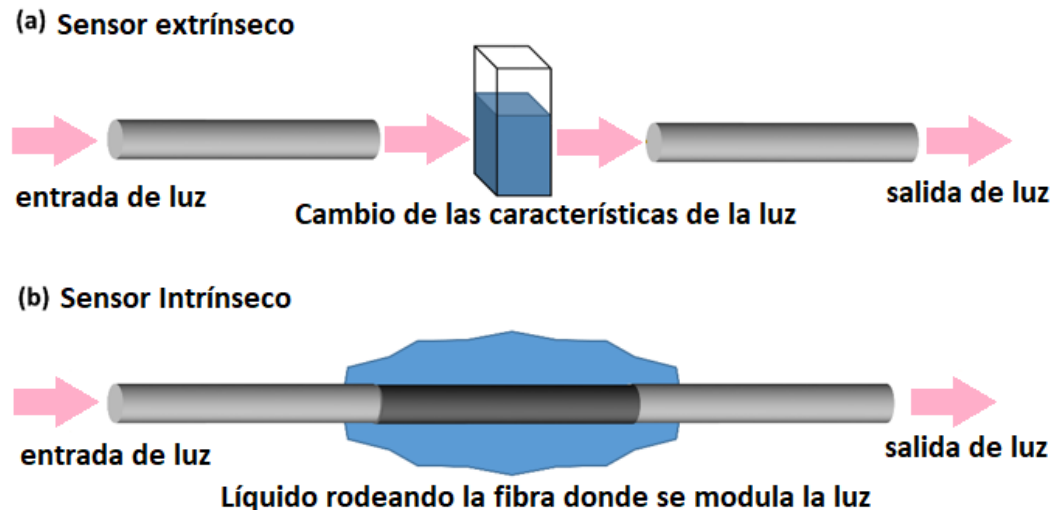


FIG 14) Clasificación de los sensores de fibra óptica, a) sensor extrínseco, b) sensor intrínseco.

2.3.2.1 Sensores extrínsecos

Los sensores extrínsecos están caracterizados por la capacidad de realizar las mediciones fuera de la fibra óptica; es decir, la luz sale de la fibra y es afectada por el parámetro que se quiere medir, convirtiéndose en portadora de la variación del mismo y siendo guiada posteriormente por la misma fibra emisora u otra fibra diferente [3]. Este tipo de estructura es muy habitual utilizarla para mediciones de presión, humedad, temperatura y desplazamiento entre otras. En este trabajo se presenta un sensor extrínseco utilizando una fibra de núcleo hueco.

2.3.2.2 Sensores intrínsecos

En el caso de los sensores intrínsecos la luz es guiada en todo su recorrido por una fibra óptica donde ocurren cambios de índice de refracción internos en la fibra a través de los cuales pueden medirse las variaciones provocadas por factores externos [3]. Las principales aplicaciones de estas estructuras están orientadas a la medición de variables como la temperatura, vibración, presión y humedad. Por lo general son las redes de Bragg y la interferometría las técnicas más utilizadas, como es el caso de las estructuras SMS presentes en el trabajo.

2.4 FENÓMENO DE LA INTERFEROMETRÍA

En física, una interferometría es una superposición de dos o más ondas que forman una nueva (generalmente, ondas de luz, radio o sonido). En todos los casos el principio utilizado es que dos ondas que coinciden en fase se amplifican, (interferencia constructiva), mientras que dos ondas en oposición de fase se cancelan, (interferencia destructiva), existiendo también cualquier combinación intermedia, FIG 15). Esto permite mediante medición del grado de cancelación o amplificación de dos haces láser, realizar mediciones de superficies menores a la longitud de onda. Los dos interferómetros más usados son el de Michelson y el Fabry-Perot.

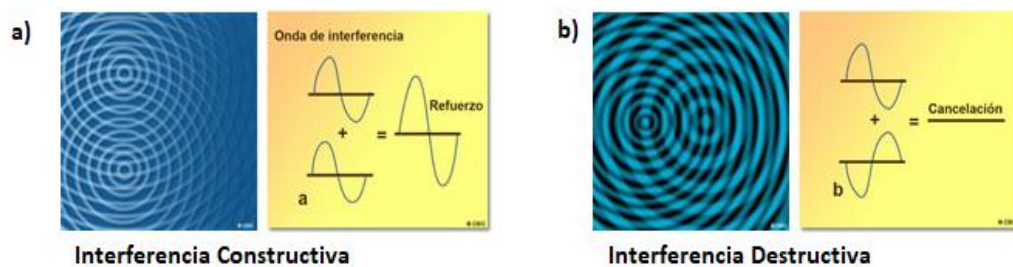


FIG 15) Interferencia de ondas, a) constructiva, b) destructiva

Albert A. Michelson fue el inventor del primer interferómetro en 1887, y demostró el uso del principio de la interferencia de la luz como método de medición. El principio básico de este interferómetro aún se mantiene en el núcleo de la interferometría, siendo mejorado por los continuos avances tecnológicos que han desarrollado hasta la actualidad. Dicho invento, se compone de un desdoblador del haz (espejo mitad plateado) y dos espejos. Cuando la luz atraviesa el espejo mitad plateado/desdoblador del haz (que refleja parcialmente) se divide en dos rayos con distintas trayectorias ópticas (una hacia el espejo 1 y otra hacia el espejo 2). Los rayos de vuelta se reflejan en los espejos y se vuelven a combinar en el desdoblador del haz antes de llegar al detector, FIG 16). La diferencia de trayectoria de los dos rayos genera una diferencia de fase que forma un patrón de borde de interferencia. Seguidamente, se analiza el patrón en el detector para evaluar las características de la onda, las propiedades del material o el desplazamiento de uno de los espejos (dependiendo de la medición para la que se utiliza el interferómetro).

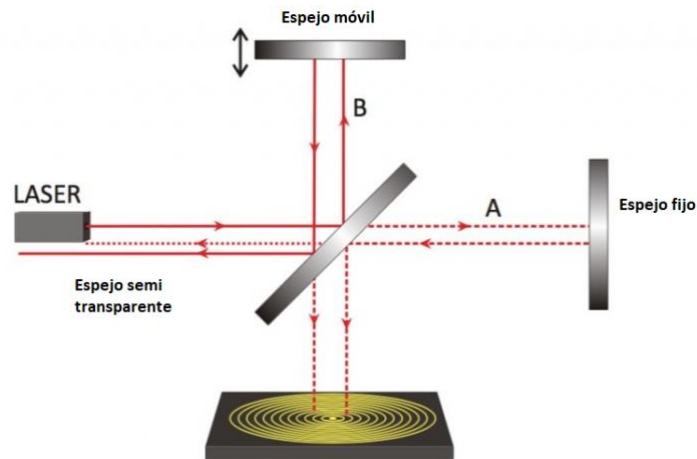


FIG 16) Esquema representativo del interferómetro de Michaelson

El interferómetro de Fabry-Perot consiste en múltiples reflexiones entre dos superficies parcialmente reflectantes y cercanas entre sí. Parte de la luz se refleja cada vez que llega a la segunda superficie, implicando en múltiples haces desfasados que se interfieren de manera constructiva y destructiva. Este interferómetro posee una resolución muy alta.

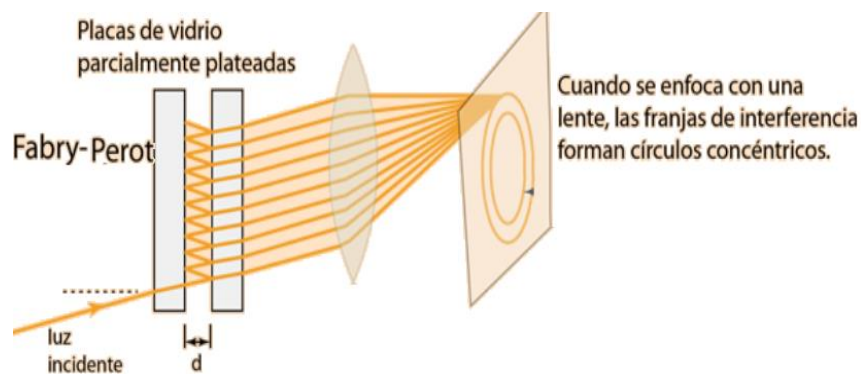


FIG 17) Esquema representativo del interferómetro de Fabry-Perot

3 EXPERIMENTOS

3.1 Análisis del comportamiento de una fibra monomodo-multimodo-monomodo (SMS) según la longitud.

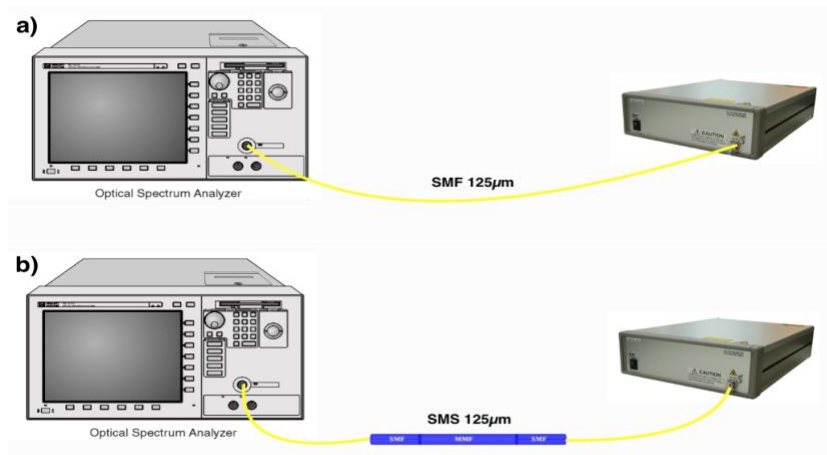


FIG 18) Setup experimental de trabajo con SMS, a) Conexión de referencia de la fuente de luz, b) conexión de la SMS.

Para entender cómo actúa una estructura monomodo-multimodo-monomodo (SMS) sobre la luz se hace lo siguiente:

Para tomar la referencia se utiliza una fuente de luz blanca, una 4-SLED de FiberLabs Inc., la cual posee 4 Led de emisión superficial (SLED). Esta se conecta directamente mediante una fibra monomodo (SMF) al equipo de medición utilizado; un Analizador de Espectros Ópticos (OSA). FIG. 18 a) y FIG. 19 a). La fuente de luz genera cuatro picos a las longitudes de ondas 1310 nm, 1430 nm, 1550 nm, 1690 nm FIG. 19 a) los cuales se corresponden con cada uno de los SLED.

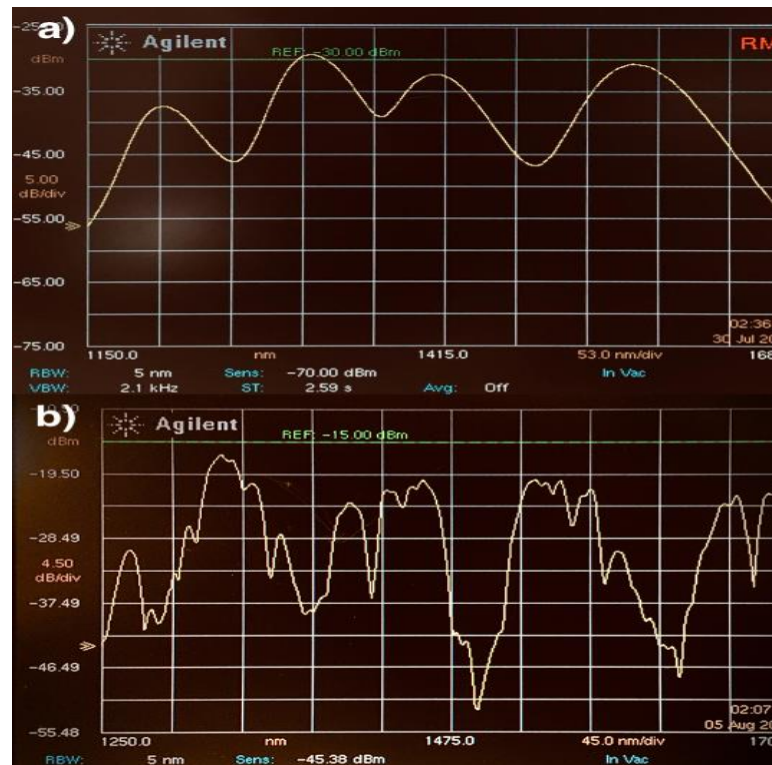


FIG 19) Espectros observados en el OSA con la fuente de luz 4-SLED, a) Referencia, b) SMS de 60mm.

Una vez tomada la referencia, se inserta la estructura creada, una monomodo-multimodo-monomodo (SMS) FIG. 18 b) y FIG. 19 b). Como fibra monomodo se utiliza una fibra no-core (solo núcleo) (Anexo 6.7).

Para la toma y registro de los espectros se utiliza un script de Matlab, guardando el espectro de referencia y efectuando la resta con el obtenido de la SMS.

Se han preparado tres estructuras SMS para determinar la posición de las bandas de transmisión/atenuación. La primera con el tramo monomodo de 15 mm, otra de 30 mm, y finalmente una de 60 mm, FIG. 20 a), b) y c) respectivamente. Estas coinciden con lo demostrado en [20].

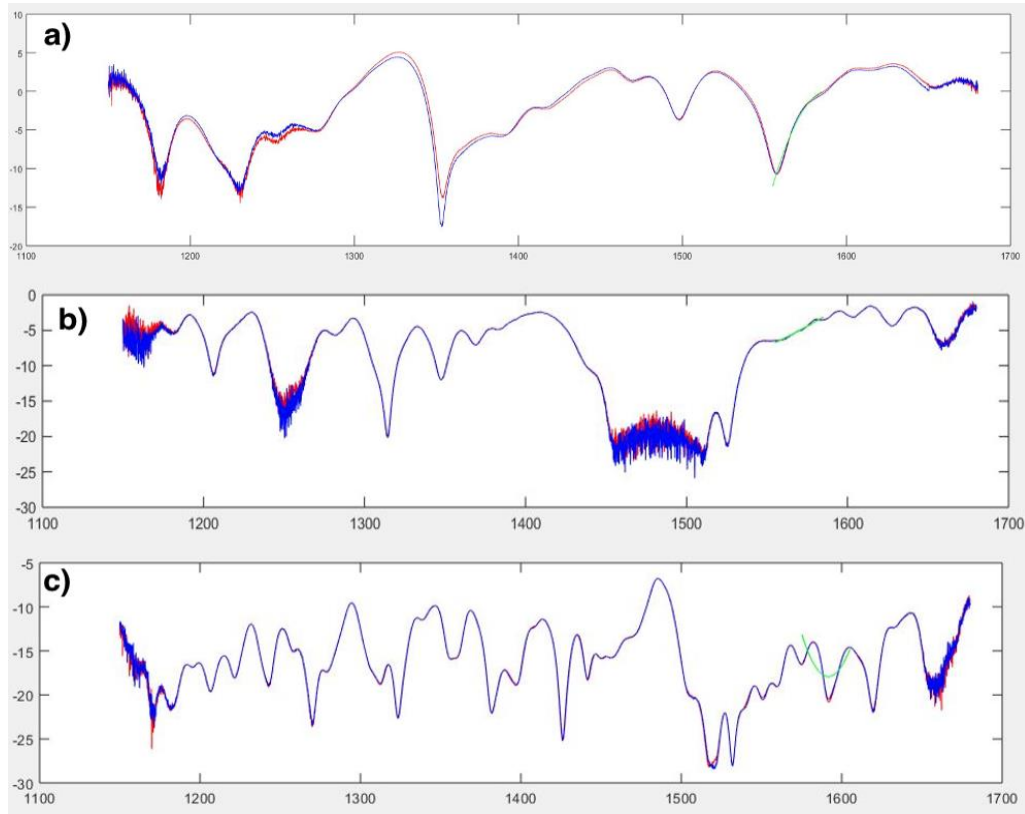


FIG 20) Espectros de las tres configuraciones de SMS creadas, a) de 15 mm de fibra MMF, b) de 30 mm de fibra MMF, c) de 60 mm de fibra MMF.

Para la SMS donde la MMF es de 15 mm la autoimagen se ubica por encima de los 1300 nm FIG. 20 a). Esta es la banda de mayor transmisión. En la SMS donde la MMF es de 30 mm la autoimagen está alrededor de los 1400 nm, FIG. 20 b), y para la SMS donde la MMF es de 60 mm la autoimagen se encuentra cerca de los 1500 nm FIG. 20 c).

Respecto a la autoimagen, esta se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{4 \times D^2 \times n \times p}{Z} \quad (21)$$

Donde, λ es la longitud de onda en nm del pico correspondiente a la autoimagen, D es el diámetro de la fibra SMS, en este caso, 125 μm ; n es el índice de refracción de la fibra (1.44), Z es la longitud del tramo de fibra MMF y p es el factor de periodicidad de la autoimagen.

CÁLCULO DE LAS 3 AUTOIMAGENES:

La autoimagen para $Z=60\text{mm}$:

$$\lambda = \frac{4 \times D^2 \times n \times p}{Z} = \frac{4 \times (125 \times 10^{-6})^2 \times 1.44}{60 \times 10^{-3}} = 1500 \text{ nm}$$

La autoimagen Z=30mm:

$$\lambda = \frac{4 \times D^2 \times n \times p}{Z} = \frac{4 \times (125 \times 10^{-6})^2 \times 1.44 \times (\frac{1}{2})}{30 \times 10^{-3}} = 1500 \text{ nm}$$

La autoimagen Z=15mm:

$$\lambda = \frac{4 \times D^2 \times n \times p}{Z} = \frac{4 \times (125 \times 10^{-6})^2 \times 1.44 \times (\frac{1}{4})}{15 \times 10^{-3}} = 1500 \text{ nm}$$

Para poder obtener la autoimagen en tercera ventana, aproximadamente en 1550 nm, se necesita un largo de SMS de 58 mm.

$$Z = \frac{4 \times D^2 \times n \times p}{\lambda} = \frac{4 \times (125 \times 10^{-6})^2 \times 1.44}{1550 \times 10^{-9}} = 58 \text{ mm}$$

La diferencia existente entre el cálculo teórico de la λ de la autoimagen y el real obtenido se debe a que la distancia a la cual se cortó la sección MMF no es exacta.

3.2 Análisis del comportamiento de una fibra SMS de longitud 60 mm frente a los cambios del índice de refracción.

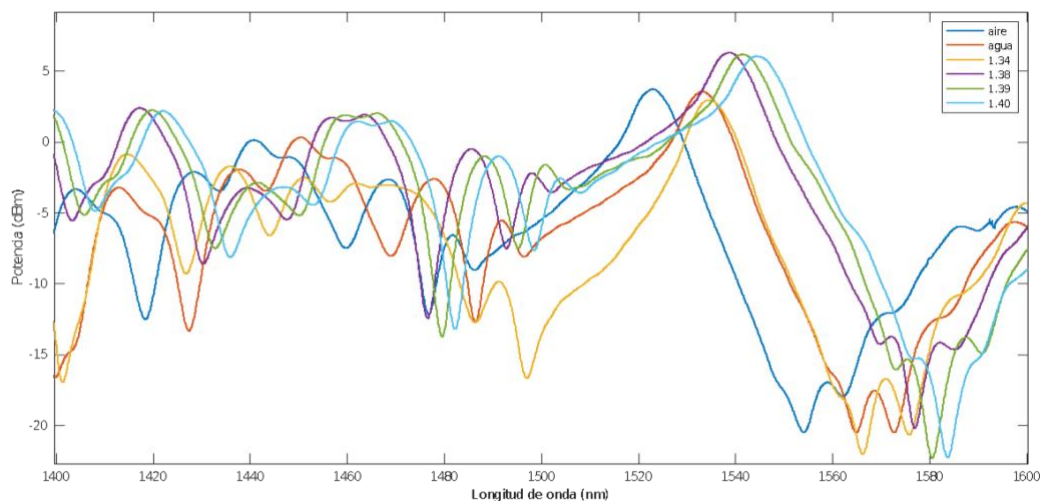


FIG 21) Desplazamiento del espectro de una estructura SMS al variar el índice de refracción.

Se ha tomado la SMS de 60 mm y se le ha variado el índice de refracción externo utilizando diferentes disoluciones de agua con glicerina. Dichas disoluciones fueron de glicerina al 10% con un índice de refracción de 1.348, al 30% con un índice de refracción de 1.380, al 40% con un índice de refracción de 1.395 y al 50% con un índice de refracción de 1.406. Los índices de refracción se comprobaron con el refractómetro Meter Toledo.

En la FIG. 21) se muestra el comportamiento mientras se varía dicho índice de refracción, donde se puede observar que mientras aumenta en índice de refracción el espectro se desplaza hacia derecha.

3.3 Análisis del comportamiento de una fibra E-SMS de longitud 67 mm frente a los cambios del índice de refracción.

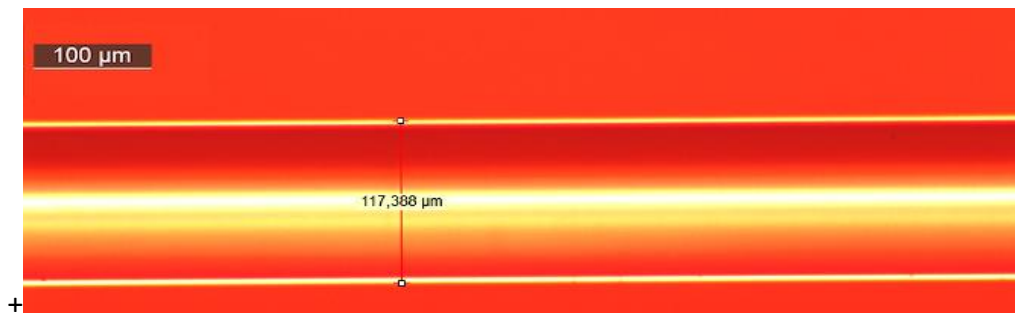


FIG 22) Imagen de la sección SMS de 67 mm después del etching.

Se ha tomado la SMS de 67 mm y se le ha realizado un proceso de ataque químico con ácido fluorhídrico (HF) logrando disminuir el diámetro de la zona MMF hasta 117,4 μm, según se muestra en la FIG. 22).

Al igual que a la fibra SMS de 30 mm, a esta se le ha variado el índice de refracción externo utilizando las mismas disoluciones de agua con glicerina ya elaboradas previamente.

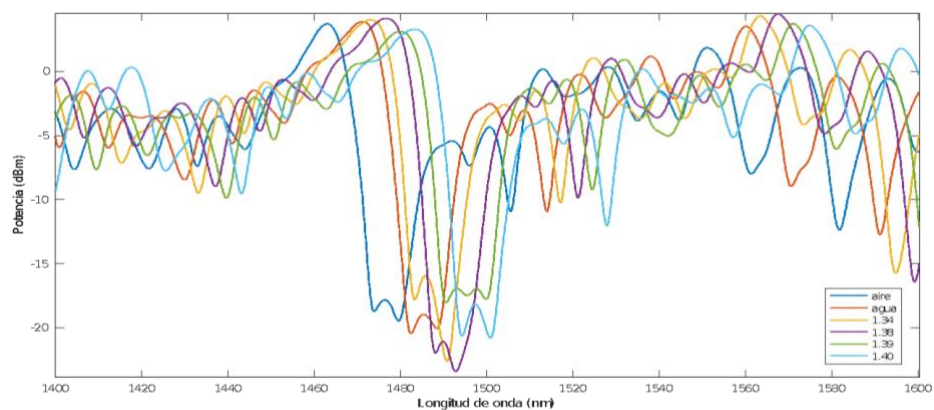


FIG 23) Desplazamiento del espectro de una estructura SMS de 67 mm al variar el índice de refracción.

En la FIG. 23) se muestra el desplazamiento del espectro hacia la derecha en la medida en que se aumenta el índice de refracción externo.

3.4 Cavidad en anillo con SMS en reflexión

3.4.1 Estudio de láser en anillo con SMS de 60 mm en transmisión.

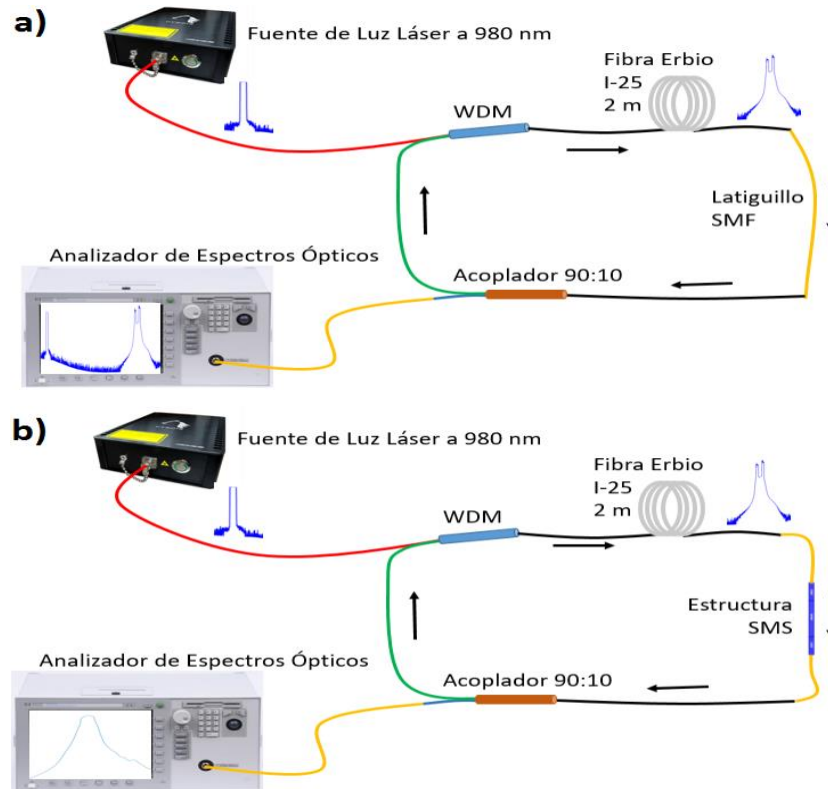


FIG 24) Configuración experimental del sistema en anillo del láser a) Conexión de referencia b) Conexión con SMS insertada

Como configuración del sistema de bombeo láser de cavidad en anillo utilizado para la estructura SMS se utiliza una fuente de luz láser que bombea a 980 nm. Esta se introduce en un multiplexor en longitud de onda (WDM) a 980 nm y a 1550 nm. La salida del multiplexor se acopla a una fibra dopada con erbio, de 2m de longitud, a la salida de la cual obtenemos amplificación a 1530nm y a 1550nm. Esta se hace pasar por un acoplador 90:10 tras el cual la salida de 90% se hace recircular nuevamente a la entrada de 1550nm del multiplexor, y la salida de 10% se conecta al OSA para la visualización del espectro óptico FIG. 24 a). En la FIG. 25 a) se muestra el espectro resultante de esta configuración, donde aparecen el bombeo a 980nm y la amplificación del erbio a 1530nm y 1550nm.

A partir de la configuración utilizada anteriormente se le ha insertado el dispositivo SMS entre la fibra de erbio y el acoplador 90:10 FIG. 24 b). En la FIG. 25 b) se puede observar el espectro resultado de la inserción de la estructura SMS en la configuración anterior.

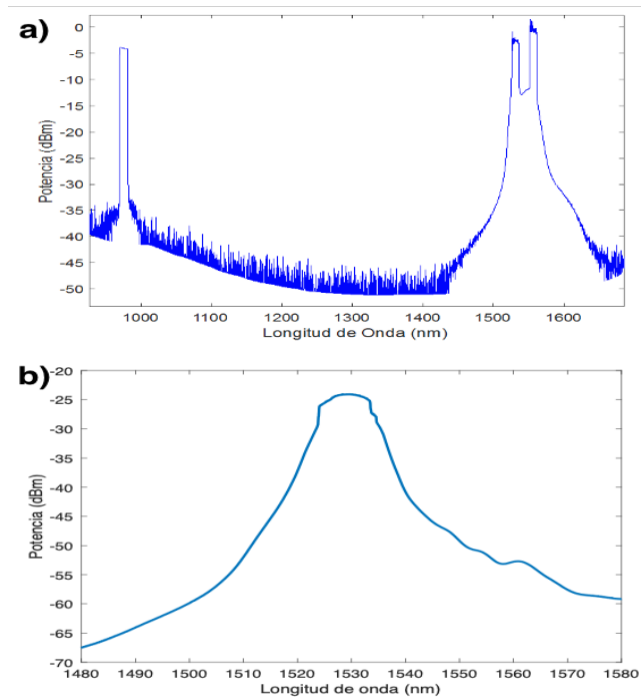


FIG 25) Espectro del láser con la SMS en transmisión a 1530 a) espectros del bombeo y la amplificación del Erbío, b) espectro resultante de la inserción de la SMS.

Para determinar la estabilidad de la estructura láser en anillo con la SMS insertada, se han capturado los espectros cada cinco minutos, durante una hora, guardando el valor de la potencia máxima y la longitud de onda a la que ocurre dicha potencia FIG. 26).

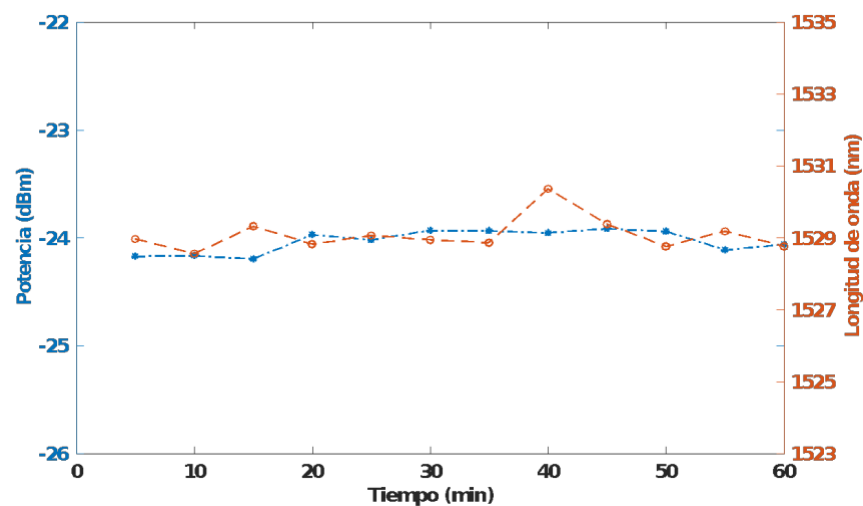


FIG 26) Estabilidad en potencia y en longitud de onda de la SMS insertada

3.4.2 Estudio de láser en anillo con SMS de 60 mm en transmisión variando el índice de refracción (IR).

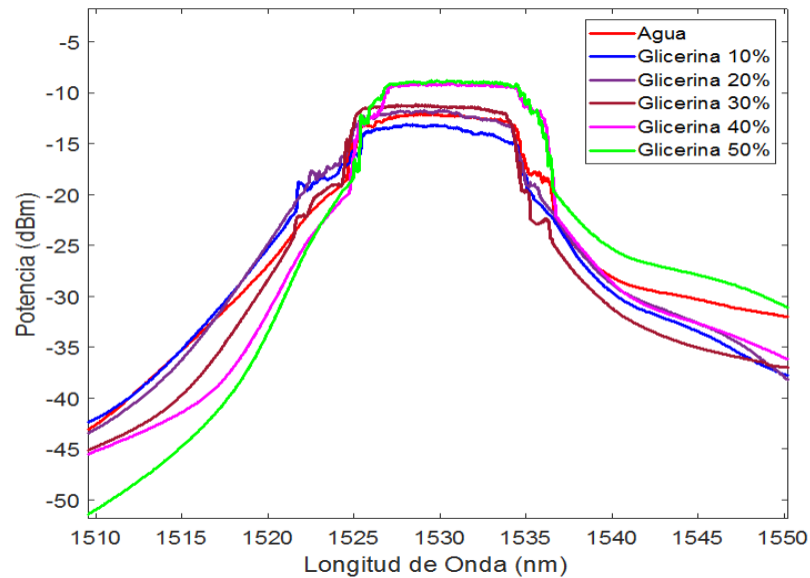


FIG 27) Espectro del láser con la SMS en transmisión a 1530 variando el índice de refracción externo.

En la figura anterior se muestra la variación de la potencia del espectro del láser con la SMS de 60 mm insertada en la medida en que se le va variando el índice de refracción externo. Se puede observar que la potencia varía en la medida en que varía los índices de refracción.

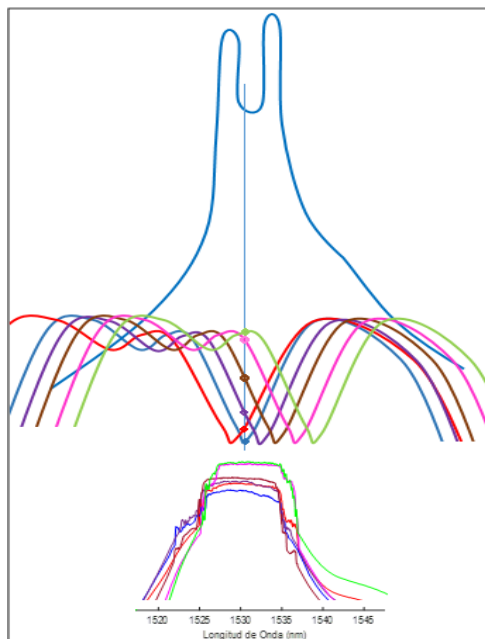


FIG 28) Explicación teórica de la variación de potencia con el índice de refracción.

La variación de potencia del pico a $\lambda=1530\text{nm}$, se puede explicar a partir del esquema de la FIG. 28). Dicho pico es el resultado de la suma de la amplificación del erbio con la SMS insertada. La señal generada por la amplificación del erbio se mantiene constante en 1530nm , mientras que la SMS insertada se desplaza hacia la derecha con el aumento del índice de refracción externo. El aumento de potencia de la señal resultante (FIG. 27)) se corresponde con el aumento de potencia a $\lambda=1530\text{nm}$ de la SMS debido a su desplazamiento.

3.4.3 Estudio de láser en anillo con SMS de 60mm en transmisión (etching 60 mm).

En la FIG. 29) se observan dos espectros. En rojo el espectro inicial de la SMS insertada en la configuración en anillo antes de efectuar el ataque químico con ácido fluorhídrico (HF). En azul el espectro final después de haber efectuado el etching obteniendo un diámetro resultante de $93,7\mu\text{m}$, FIG. 30).

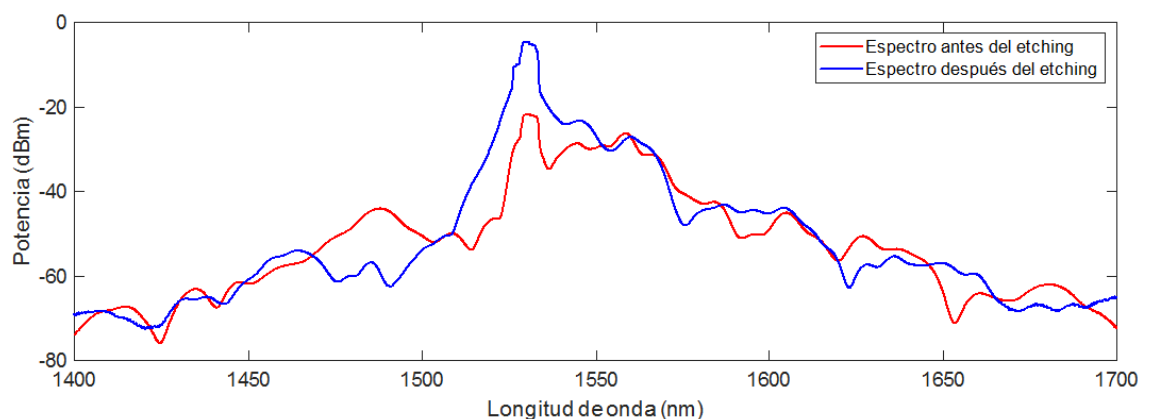


FIG 29) Espectro del anillo con SMS insertada antes (espectro rojo), y después del etching (espectro azul).

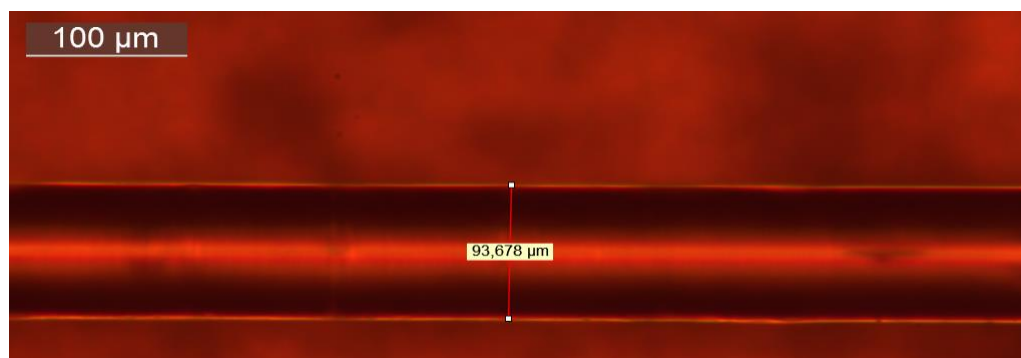


FIG 30) Imagen de la sección SMS de 60 mm después del etching.

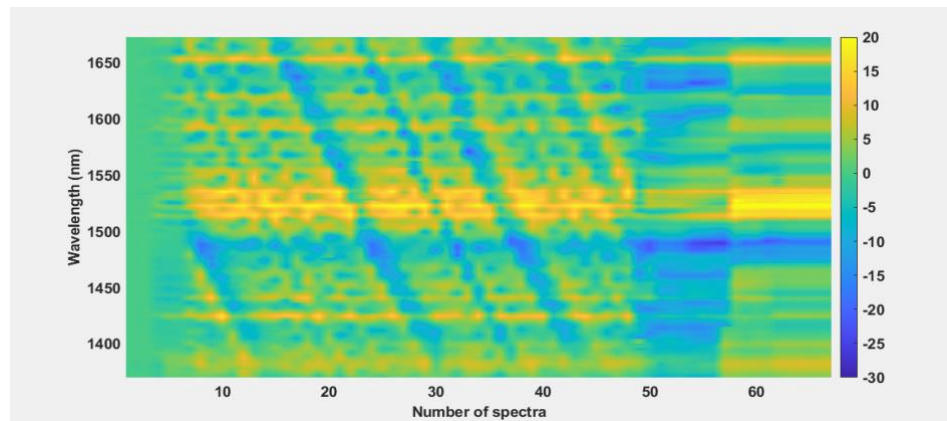


FIG 31) Vista de pájaro del proceso de etching de la SMS 60 mm.

La FIG. 31) representa la vista de pájaro durante el proceso de etching de la fibra SMS de 60mm. Es fácil observar como los valores mínimos de señal se desplazan hacia la izquierda, es decir, de longitudes de onda mayores a longitudes de onda menores. Por ejemplo, en el espectro 10 tenemos un valor mínimo a una longitud de onda de 1550nm aproximadamente y, tras tomar unos pocos espectros más, este mínimo se ve reflejado en 1400nm.

La zona espectral alrededor de 1530nm siempre va a mostrar niveles altos de potencia debido a la amplificación del erbio, con lo cual tendrá valores mayores o menores en cada desplazamiento, pero siempre será una potencia mayor con respecto a la encontrada en longitudes de onda cercana.

3.4.4 Análisis del comportamiento de una fibra SMS de 60mm tras el proceso de ataque químico con HF (etching de 1 mm de longitud)

En la FIG. 32) se observan dos espectros. En rojo el espectro inicial de la SMS en aire antes de efectuar el ataque químico. En azul el espectro final después de haber efectuado el etching de una longitud de 1mm y un diámetro resultante de 54.9 μ m, FIG. 33). Comparando el antes y el después, se puede observar un desplazamiento del espectro.

Desarrollo de sensores con cavidad láser de fibra óptica

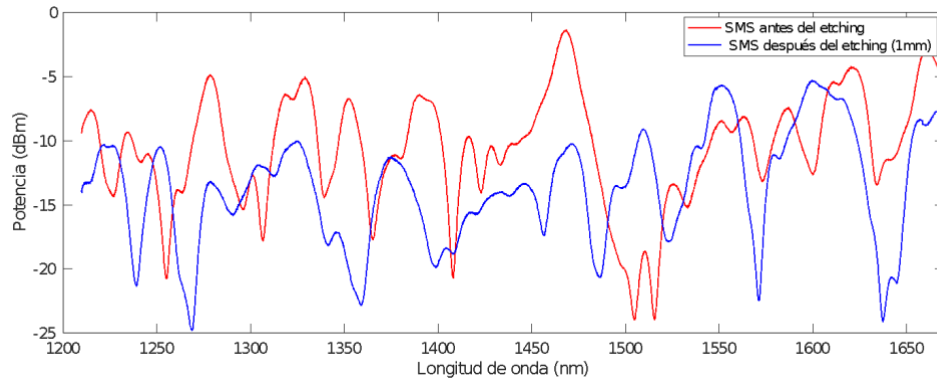


FIG 32) Espectro de la SMS antes (espectro rojo), y después del etching (espectro azul).

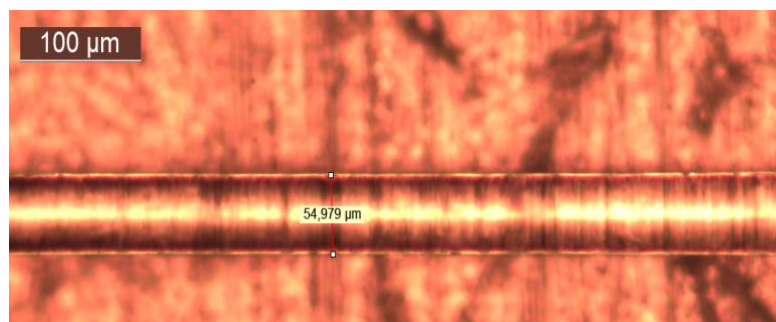


FIG 33) Imagen de la sección SMS de 1 mm después del etching

3.4.5 Estudio de la estabilidad de la configuración en anillo con SMS insertada (etching 1mm).

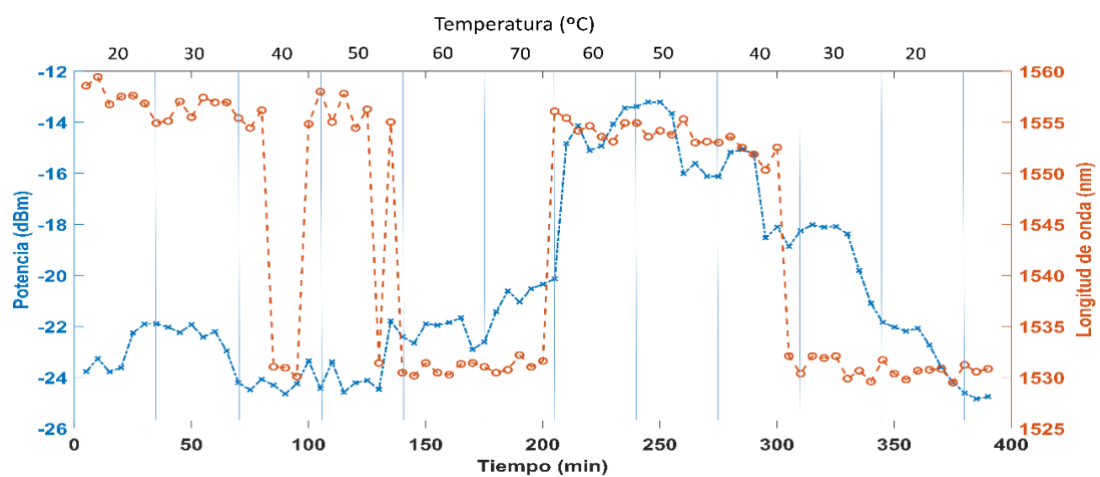


FIG 34) Gráfico de cambio de Potencia y Longitud de onda con la temperatura de todo el espectro.

Utilizando el setup de la FIG. 24 b) se realizó una prueba de estabilidad frente a la temperatura. Para ello se puso la fibra SMS descrita en el apartado anterior (VII) en la cámara climática y se programó para efectuar escalones de temperatura en saltos de 10 grados desde 20 a 70 grados. Los saltos en longitud de onda y potencia se deben a que cuando se inserta la SMS aparecen dos picos, uno a 1530 y otro a 1550 (amplificación del erbio FIG. 25 a)), y durante los cambios de temperatura se produce saltos bruscos de la longitud de onda a la cual se obtiene la máxima potencia (FIG. 34)). En la FIG.35) se muestra los cambios de potencia a las longitudes de onda donde se generan los dos picos (1530 y 1550).

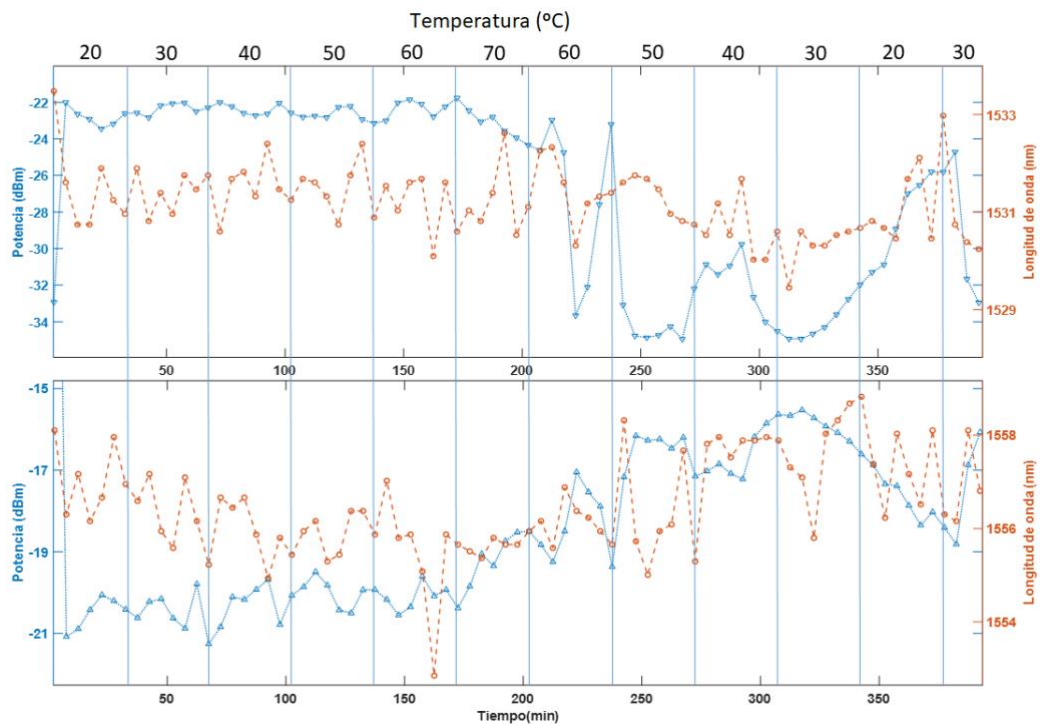


FIG 35) Gráfico de cambio de Potencia y Longitud de onda con la temperatura, de los dos picos por separado.

3.5 Cavidad en anillo con interferometría en reflexión

3.5.1 Proceso de fabricación

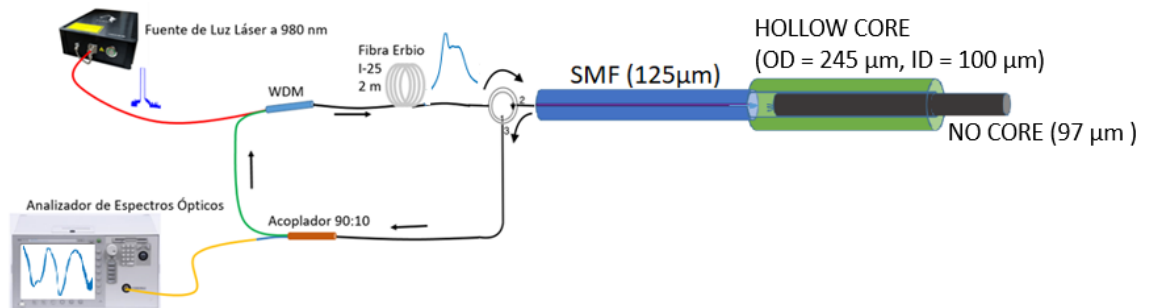


FIG 36) Setup utilizado como cavidad en anillo con interferometría en reflexión.

En la FIG 36), se muestra el setup utilizado para esta estructura. Se emplea la misma configuración en anillo, ya antes utilizada, pero en este caso en reflexión. Como sensor se emplea un interferómetro basado en cavidad hueca, en modo de reflexión combinando tres tipos diferentes de fibras.

El sensor aquí desarrollado se ha basado en una de las estructuras planteadas en [14]. Dicho sensor se compone, en primer lugar, de una fibra monomodo (SMF) de 125/8 μm , por donde circula la luz confinada, la cual es empalmada a una fibra hueca (hollow core (HC)) de 245 μm de diámetro exterior (OD) y 100 μm de diámetro interior (ID), parte hueca.

Posteriormente, se utiliza una fibra de solo núcleo (no core (NC)) de 115 μm , la cual es reducida a 96 μm en un extremo mediante la técnica de etching (ataque químico con HF) además de, depositar un espejo de plata sobre la zona reducida, mediante sputtering, con la intención de convertirla en un elemento reflectante, FIG 37).

A la fibra hueca se le introduce la fibra NC hasta lograr una separación de 34 μm entre las SMF y la fibra espejo, FIG 38). Cabe destacar, que, para la introducción de la fibra reflectante o espejo dentro del núcleo de la HC, se ha hecho uso de la empalmadora de fibra en modo manual.

Respecto a la trayectoria de la luz, esta sigue el núcleo de 8 μm de la SMF en forma de haces confinados con la misma fase y trayectoria hasta llegar al núcleo de la fibra hueca de 100 μm , donde la luz se dispersa y los rayos siguen distintas trayectorias hasta llegar al elemento reflectante (fibra de 96 μm con el espejo), donde cada una de estas trayectorias rebotan creando interferometrías dentro del núcleo hueco, como resultado

de la suma de ondas en fase y en contrafase. Estas vuelven a acoplarse dentro de la fibra SMF.

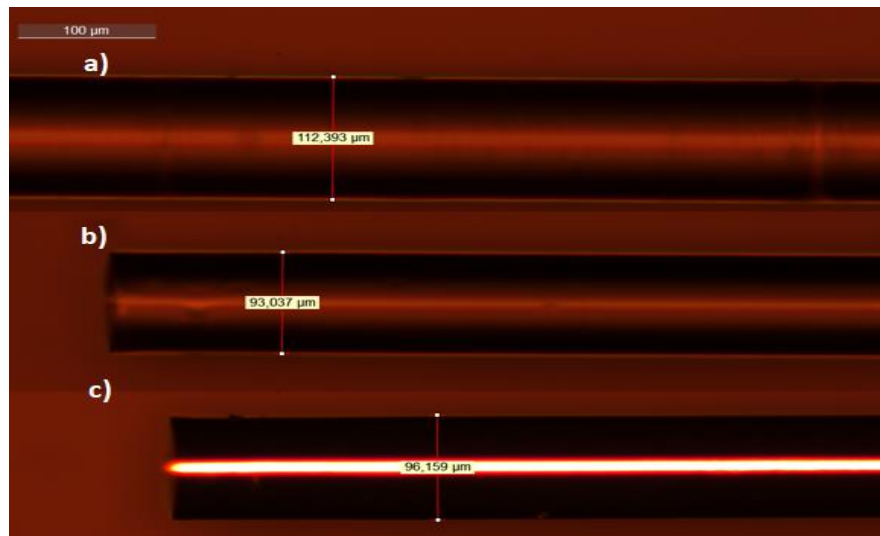


FIG 37) Imagen del microscopio de la fibra no core utilizada como espejo, a) Zona sin etching, b) Zona con etching y c) Zona con etching después de depositar el espejo de plata.

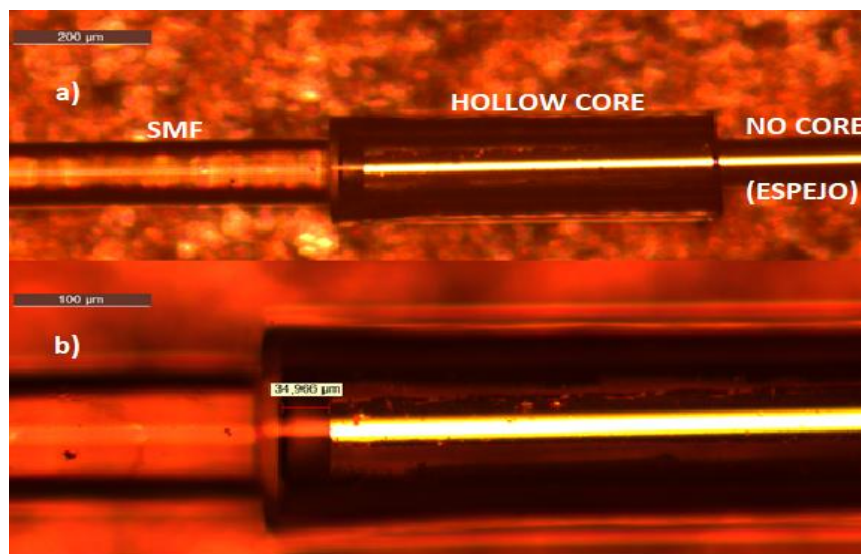


FIG 38) Imagen del microscopio de fibra sensor, a) Imagen completa del sensor donde aparecen las tres fibras (SMF-HC-NC) y b) Imagen ampliada donde se aprecia la longitud de la cavidad hueca.

El proceso de fabricación se fue monitorizando constantemente, en la medida en que se fue introduciendo la fibra no core dentro de la hollow core. Como resultado del proceso, se fueron generando diferentes interferometrías, como se muestra en la FIG 39). En un inicio aparece una interferometría de mayor frecuencia y menor amplitud, la cual en la medida en que disminuye la distancia entre la fibra espejo y la SMF va disminuyendo en frecuencia y aumentando en amplitud hasta llegar a la forma de la

señal que se desea finalmente. Al finalizar se obtuvo el espectro mostrado en la FIG 40), el cual se encontró a la distancia de 34 μm señalada anteriormente.

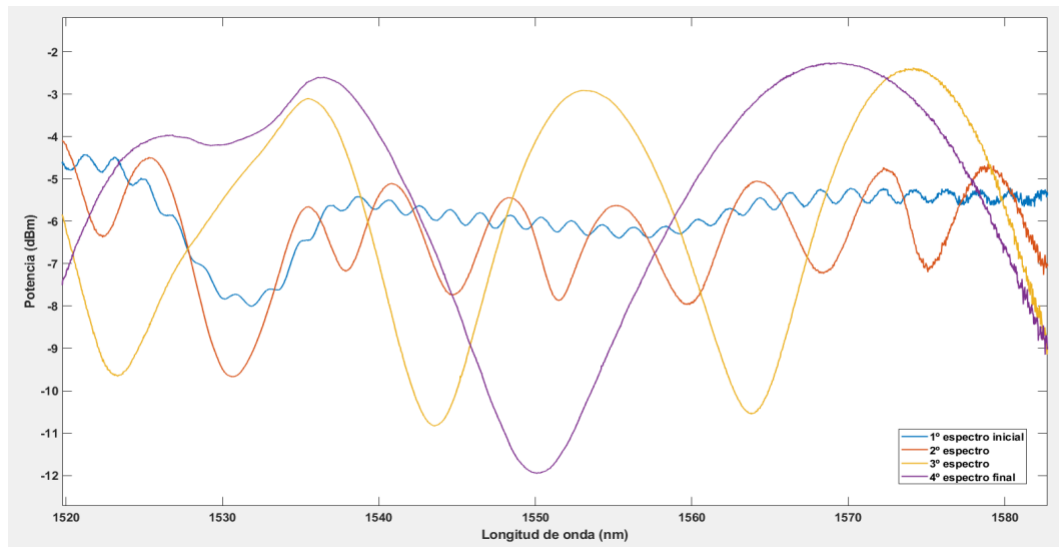


FIG 39) Espectros de transmisión resultantes del proceso de fabricación del sensor. En azul se muestra el espectro inicial a mayor distancia entre la fibra espejo y la SMF. El espectro final se muestra en color morado.

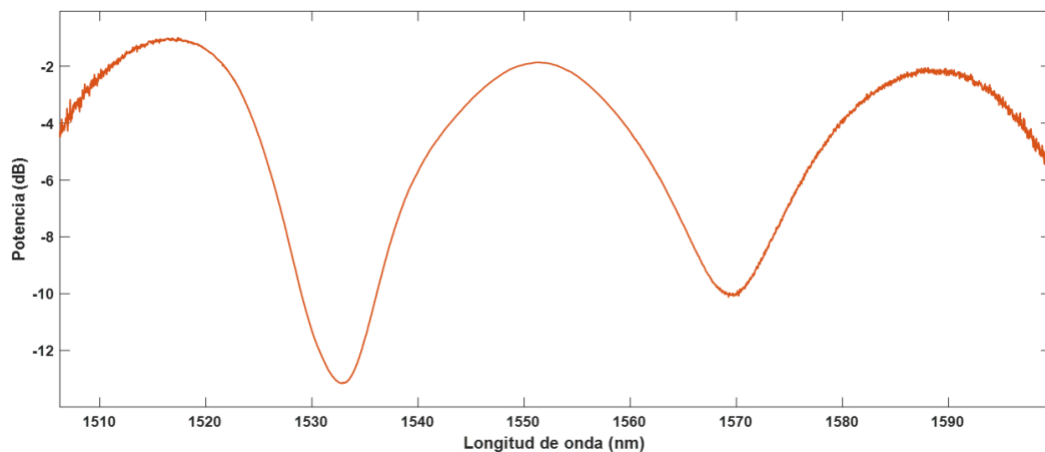


FIG 40) Espectro final de transmisión resultante de la interferometría generada a una distancia de 34 μm entre la fibra espejo y la SMF.

3.5.2 Estudio de la estabilidad en temperatura del sensor en reflexión (I)

3.5.2.1 Mecanismo de regulación de temperatura.

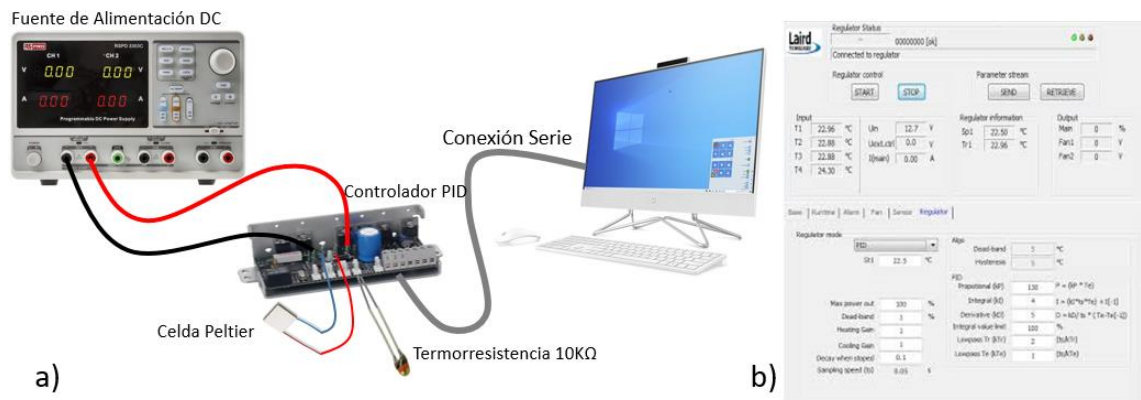


FIG 41) Configuración del controlador de temperatura PID, a) Conexiones eléctricas, b) Imagen del software controlador.

Para este experimento, se ha usado un controlador PID el cual tiene la función de controlar la temperatura de una celda Peltier. Dicho controlador, incluye, para su funcionamiento, una fuente de alimentación con 15V/2A, además de un sensor de temperatura, que en nuestro caso es una termo resistencia ($R=10K\Omega$), y comunicación serie con un ordenador, FIG 41 a). El controlador lo gobierna el programa “LT_Interface 1.0.1”, donde se especifican parámetros tales como el puerto de comunicación, el sensor a utilizar, y los parámetros del controlador. Además, nos muestra en todo momento la temperatura a controlar ($Sp1$) y la que se está sensando ($Tr1$), FIG 41 b).

3.5.2.2 Resultados obtenidos.

Siguiendo el esquema del setup FIG 36) y utilizando la configuración de la FIG 41), se realizó un experimento que consistió en variar la temperatura de 20°C a 24°C en saltos de 1°C , tanto en subida como en bajada. En la FIG 42), se muestra el desplazamiento en longitud de onda hacia la derecha del espectro tras variar la temperatura. Para determinar el comportamiento del sensor se seleccionó el máximo que aparece a 1565 nm de la señal interferómetro. Esto se debió a que es el que mejor relación S/N presentó durante el experimento. El gráfico resultante del seguimiento del máximo respecto a los cambios de temperatura se muestra en la FIG 43) y 44). En estas se puede observar que el comportamiento del sensor es estable retornando, el máximo, a la misma longitud de onda. La sensibilidad resultante fue de aproximadamente $5,75\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$.

Desarrollo de sensores con cavidad láser de fibra óptica

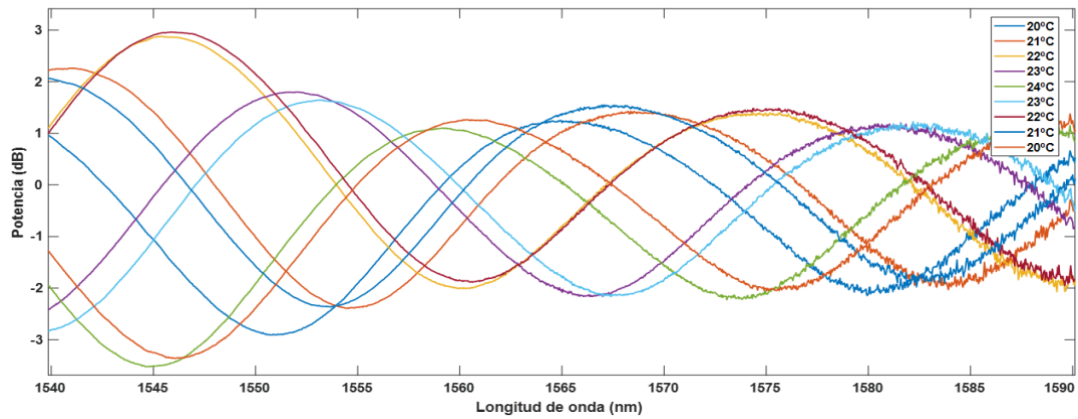


FIG 42) Gráfica de variación del espectro de la señal de interferometría al variar la temperatura.

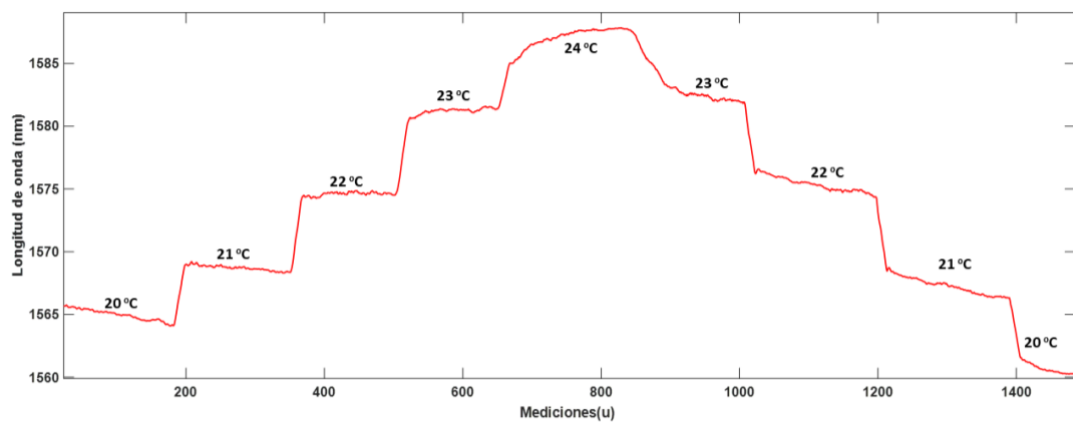


FIG 43) Gráfica del desplazamiento de la longitud de onda al variar la temperatura de 20°C a 24°C en escalones de 1°C.

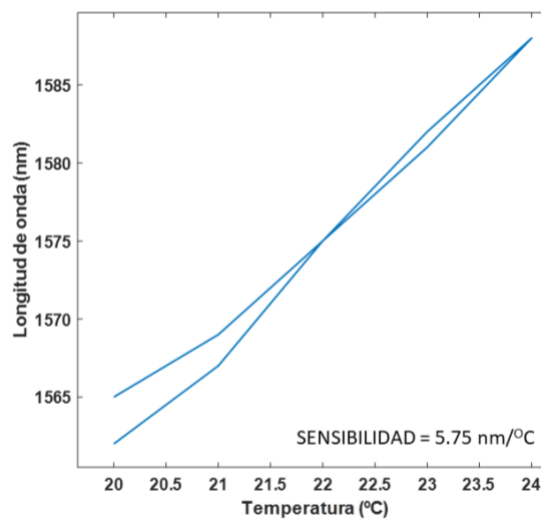


FIG 44) Gráfica de variación de longitud de onda con respecto a la temperatura.

Otro experimento realizado consistió en efectuar varios saltos de temperatura de 20°C a 22°C, para comprobar la estabilidad del sensor. En la FIG 45), se muestra el desplazamiento tanto a la derecha como a la izquierda en longitud de onda del espectro

tras variar la temperatura. El gráfico resultante del seguimiento del máximo respecto a los cambios de temperatura se muestra en la FIG 46). En estas se puede observar que el comportamiento del sensor presenta una deriva. Para solucionar este problema se propone utilizar una cámara climática para controlar los cambios de temperatura.

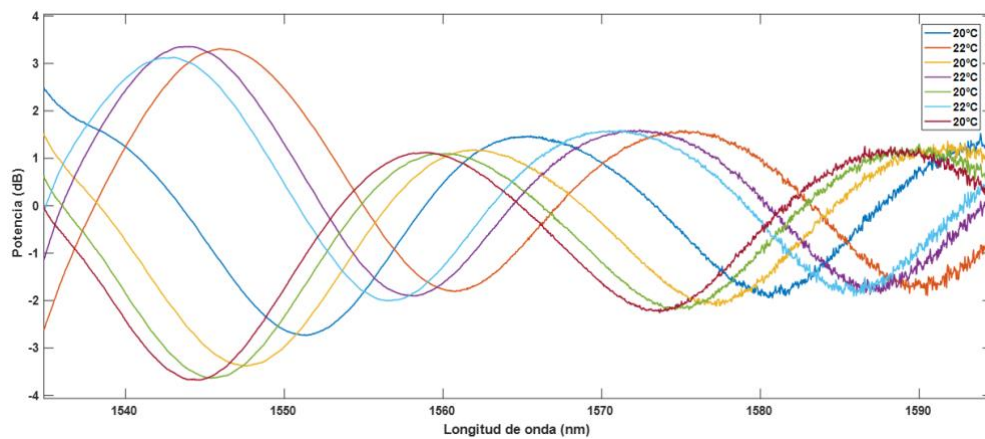


FIG 45) Gráfica de variación del espectro de la señal de interferometría al variar la temperatura.

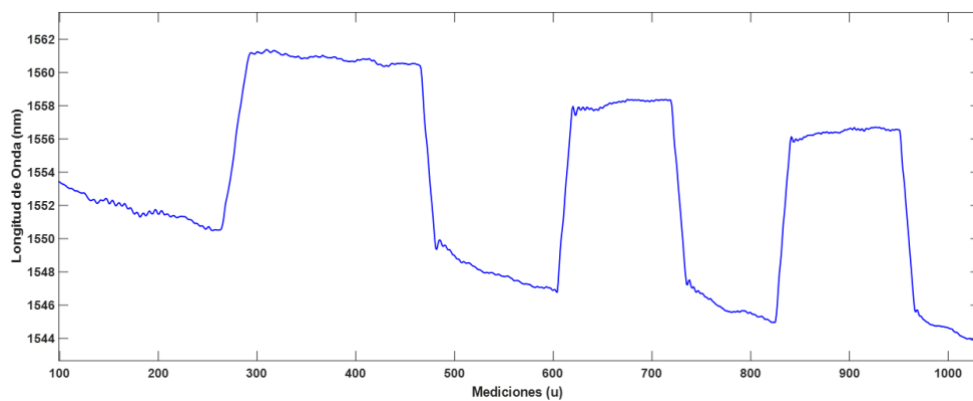


FIG 46) Gráfica del desplazamiento de la longitud de onda al variar la temperatura en saltos de 20°C a 22°C

3.5.3 Estudio de la estabilidad en temperatura del sensor en reflexión (II)

3.5.3.1 Mecanismo de regulación de temperatura.

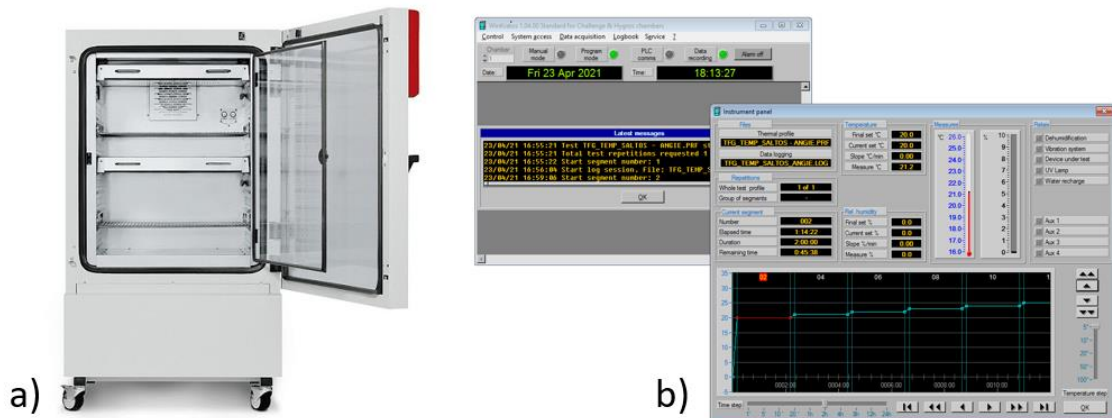


FIG 47) Cámara climática utilizada para los cambios de temperatura a) Imagen de la cámara climática, b) Imagen del software controlador.

Para este experimento, se ha usado una cámara climática la cual tiene la función de controlar la temperatura y la humedad. Para la medición de los valores de temperatura y humedad utiliza dos sensores PT100, uno para bulbo seco y otro para bulbo húmedo. El software utilizado en este caso es el WinKratos, el cual permite programar segmentos de temperatura y humedad durante un determinado tiempo. En este caso solamente se varió la temperatura, manteniendo constante la humedad al 40%.

3.5.3.2 Resultados obtenidos.

Utilizando el mismo setup de la FIG 36) y para controlar en este caso, la cámara climática, se realizó un experimento que consistió en variar la temperatura de 21°C a 25°C en saltos de 1°C, tanto en subida como en bajada.

Para determinar el comportamiento del sensor se seleccionó el mínimo que aparece a 1480 nm de la señal interferómetro. El gráfico resultante del seguimiento respecto a los cambios de temperatura se muestra en la FIG 48) y 49). En estas se puede observar que el comportamiento del sensor es estable retornando a la misma longitud de onda. La sensibilidad resultante fue de aproximadamente 38,7 nm/°C.

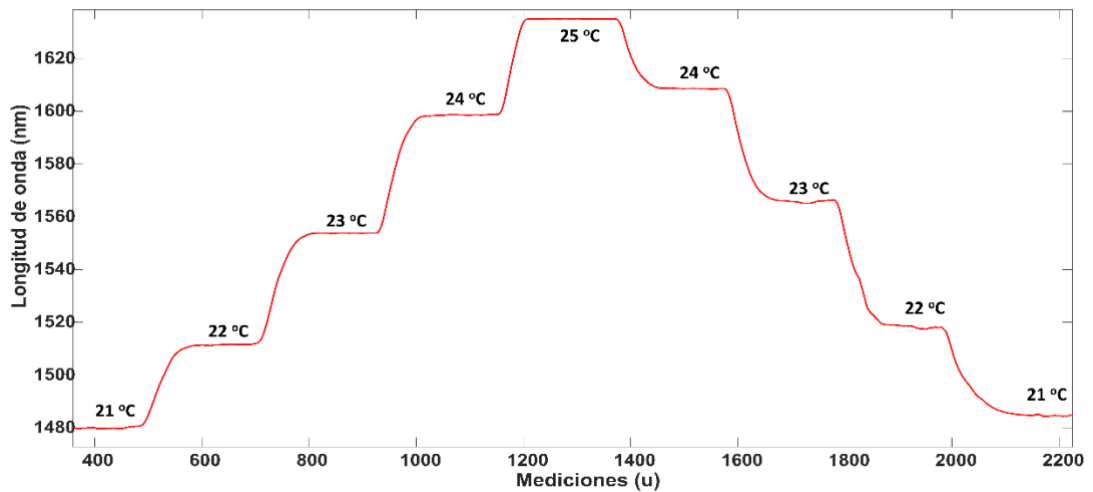


FIG 48) Gráfica del desplazamiento de la longitud de onda al variar la temperatura de 21°C a 25°C en escalones de 1°C.

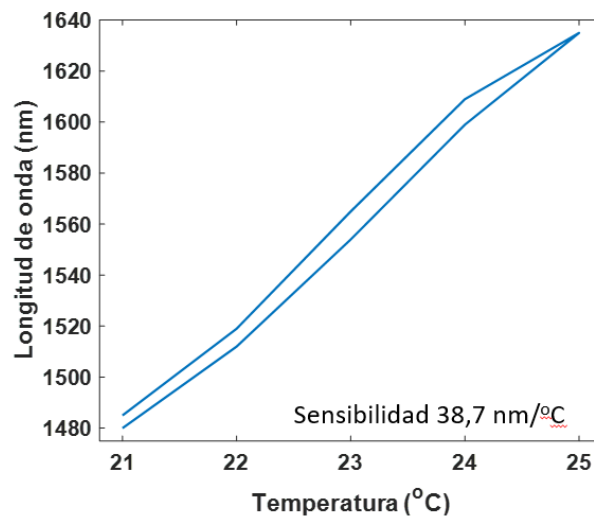


FIG 49) Gráfica de variación de longitud de onda con respecto a la temperatura

Otro experimento realizado consistió en efectuar varios saltos de temperatura de 20°C a 21°C, para comprobar la estabilidad del sensor. En la FIG 50), se muestra el gráfico resultante del seguimiento del mínimo respecto a los cambios de temperatura. En estas se puede observar que el comportamiento del sensor presenta una deriva, al igual que el anterior.

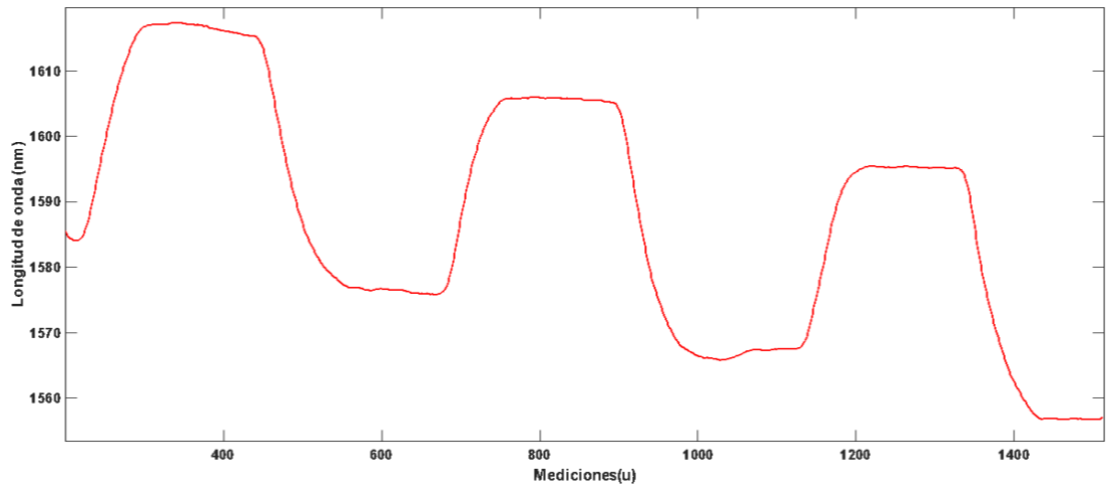


FIG 50) Gráfica del desplazamiento de la longitud de onda al variar la temperatura en saltos de 20°C a 2 °C.

4 Conclusiones.

Se presenta un estudio experimental de dos estructuras sensoras basadas en interferómetros. Una primera utilizando una estructura SMS en modo de transmisión y una segunda utilizando una cavidad hueca en modo de reflexión. Como elemento novedoso se decidió introducir una estructura láser de cavidad en anillo de una fibra dopada con Erblio como fuente de luz.

De los experimentos realizados se determinó que la estructura SMS no se presenta con buenos resultados como elemento sensor, no siendo el caso de la estructura con fibra hueca.

De esta última se desarrollaron dos pruebas de temperatura, obteniendo sensibilidades muy altas para estos tipos de sensores de fibra óptica como es el caso de 5.75nm/°C y 38.7 nm/°C.

Como trabajos futuros se espera continuar con pruebas en la fibra hueca empleando ésta como sensor de vibraciones y tensión.

5 Bibliografía

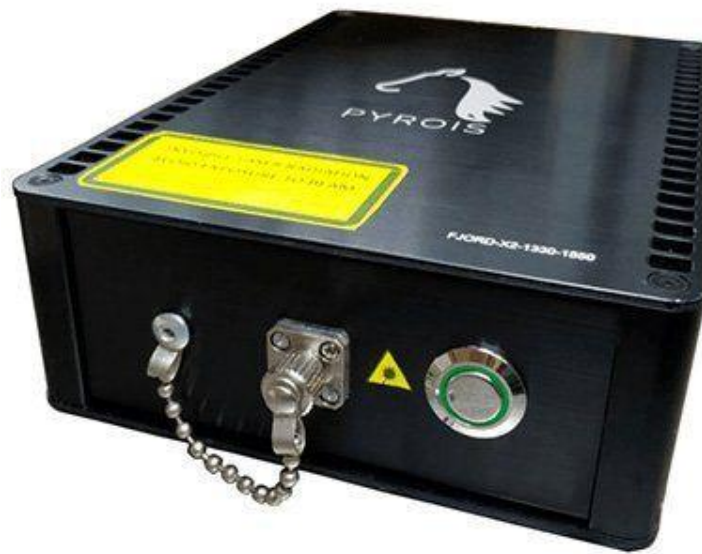
- [1] V. Vali and R. W. Shorthill, "Fiber ring interferometer," *Appl. Opt.*, vol. 15, no. 5, p. 1099, May 1976, doi: 10.1364/ao.15.001099.
- [2] C. Elosua *et al.*, "Micro and nanostructured materials for the development of optical fibre sensors," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 10. MDPI AG, Oct. 28, 2017, doi: 10.3390/s17102312.
- [3] I. Villar and I. R. Matias, Eds., *Optical Fibre Sensors*. Wiley, 2020.
- [4] X. W. Ye, Y. H. Su, and J. P. Han, "Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review," *Scientific World Journal*, vol. 2014. Hindawi Publishing Corporation, 2014, doi: 10.1155/2014/652329.
- [5] A. Barrias, J. R. Casas, and S. Villalba, "A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 5. MDPI AG, p. 748, May 23, 2016, doi: 10.3390/s16050748.
- [6] S. Diaz and M. Lopez-Amo, "Dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium fiber laser for temperature measurements," *Opt. Eng.*, vol. 53, no. 3, p. 036106, Mar. 2014, doi: 10.1117/1.oe.53.3.036106.
- [7] A. A. Abdo *et al.*, "Discovery of TeV Gamma-Ray Emission from the Cygnus Region of the Galaxy," *Astrophys. J.*, vol. 658, no. 1, pp. L33–L36, Mar. 2007, doi: 10.1086/513696.
- [8] J. J. C. y S. M. Ransom and J. J. C. y S. M. Ransom, *Essential Radio Astronomy: Pulsar Properties*. National Radio Astronomy Observatory.
- [9] B. Lee, "Review of the present status of optical fiber sensors," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 57–79, 2003, doi: 10.1016/S1068-5200(02)00527-8.
- [10] J. M. Senior, M. Y. Jamro, and J. M. Senior, *Optical fiber communications: principles and practice*. Pearson Education, 2009.
- [11] X. Zhou, G. Liang, and T. Wang, "An optical add-drop multiplexer design based on fiber Bragg gratings," in *ICEOE 2011 - 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics, Proceedings*, 2011, vol. 2, doi: 10.1109/ICEOE.2011.6013169.
- [12] "City of light: the story of fiber optics," *Choice Rev. Online*, vol. 37, no. 05, pp. 37-2802-37–2802, Jan. 2000, doi: 10.5860/choice.37-2802.
- [13] H. H. Hopkins and N. S. Kapany, "Transparent Fibres For The Transmission Of Optical Images," *Opt. Acta Int. J. Opt.*, vol. 1, no. 4, pp. 164–170, Feb. 1955, doi: 10.1080/713818685.
- [14] S. Pevec and D. Donlagić, "Multiparameter fiber-optic sensors: a review," *Opt. Eng.*, vol. 58, no. 07, p. 1, 2019, doi: 10.1117/1.oe.58.7.072009.
- [15] M. qing Chen, Y. Zhao, F. Xia, Y. Peng, and R. jie Tong, "High sensitivity temperature sensor based on fiber air-microbubble Fabry-Perot interferometer with PDMS-filled hollow-core fiber," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 275, pp. 60–66, 2018, doi: 10.1016/j.sna.2018.03.044.
- [16] Y. Zhao, R. jie Tong, M. Q. Chen, and F. Xia, "Relative humidity sensor based on hollow core fiber filled with QDs-PVA," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 284, no. June 2018, pp. 96–102, 2019, doi: 10.1016/j.snb.2018.12.130.
- [17] S. Kumar, R. Singh, B. K. Kaushik, N. K. Chen, Q. S. Yang, and X. Zhang, "Lspr-based

cholesterol biosensor using hollow core fiber structure," *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 17, pp. 7399–7406, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2916818.

- [18] Y. J. Rao, "In-line fiber-optic etalon formed by hollow-core photonic crystal fiber," *2007 Asia Opt. Fiber Commun. Optoelectron. Expo. Conf. AOE*, vol. 32, no. 18, pp. 124–126, 2007, doi: 10.1109/AOE.2007.4410725.
- [19] Y. Lin, W. Jin, F. Yang, Y. Tan, and H. L. Ho, "Performance optimization of hollow-core fiber photothermal gas sensors," *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 22, p. 4712, 2017, doi: 10.1364/ol.42.004712.
- [20] A. B. Socorro, I. Del Villar, J. M. Corres, F. J. Arregui, and I. R. Matias, "Mode transition in complex refractive index coated single-mode–multimode–single-mode structure," *Opt. Express*, vol. 21, no. 10, p. 12668, May 2013, doi: 10.1364/oe.21.012668.

6 ANEXOS

6.1 Especificaciones del láser de bombeo (976nm 300mW)



THORLABS**976 nm, 300 mW Butterfly Laser, SM Fiber with FBG****BL976-SAG300****Description**

Thorlabs' BL976-SAG300 is a 976 nm, 300 mW FBG-stabilized laser with a SM fiber output and FC/APC connector in a 14-pin, hermetically sealed butterfly package. It is well suited for low-noise core pumping of Erbium-doped fiber including CW lasers, mode-locked oscillators and EDFA's, as well as other applications that benefit from an FBG-stabilized or higher power single mode laser. The FBG, which is temperature-insensitive by virtue of its design, stabilizes the Fabry-Perot gain chip emission and also reduces the gain chip's sensitivity to external reflection. BL976-SAG300 is Telcordia™ GR-468 CORE qualified.

Specifications**BL976-SAG300 Absolute Max Ratings^a**

LD Reverse Voltage (Max)	2.0 V
Absolute Max Current	600 mA
Absolute Max Power	350 mW
PD Reverse Voltage (Max)	15 V
Operating Case Temperature ($T_{\text{submount}} = 25^{\circ}\text{C}$)	-5 to +75 $^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature	-40 to 85 $^{\circ}\text{C}$
Max Tightening Torque	150 mN•m



- a. Absolute Maximum Rating specifications should never be exceeded. Operating beyond these conditions can seriously damage the laser.
 b. $T_{\text{CHIP}} = 25^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{CASE}} = -5^{\circ}\text{C}$ to 75°C

BL976-SAG300 Operation Specs

	Symbol	Min	Typical	Max
Peak Wavelength ^a	λ_p	975.5 nm	976 nm	976.5 nm
Spectral Bandwidth, @ -3 dB	$\Delta\lambda$	-	-	1 nm
Output CW Operating Power	P_{OP}	300 mW	-	-
Kink-Free Power	$P_{\text{Kink-Free}}$	-	330 mW	-
Threshold Current	I_{TH}	-	45 mA	60 mA
Forward Current (@ P_{OP})	I_{OP}	-	470 mA	515 mA
Slope Efficiency	$\Delta P / \Delta I$	0.65 W/A	0.76 W/A	-
Forward Voltage	V_F	-	1.8 V	2.0 V
Power Stability ^b	P_{stab}	-	< 1%	2%
Temp. Coefficient of FBG (@ P_{OP})	$\Delta\lambda / \Delta T$	-	0.01 nm/ $^{\circ}\text{C}$	0.02 nm/ $^{\circ}\text{C}$
Monitor PD Responsivity ^c (@ I_{OP})	I_{MON} / P	0.5 $\mu\text{A}/\text{mW}$	-	10 $\mu\text{A}/\text{mW}$

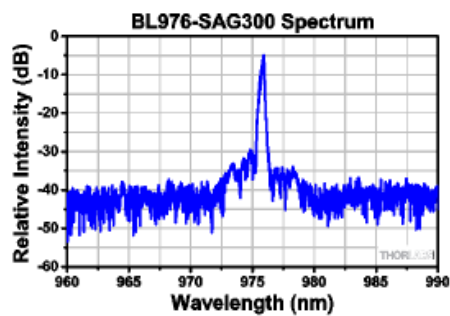
- a. Vacuum Wavelength, @ $T_{\text{CASE}} = T_{\text{FBG}} = 25^{\circ}\text{C}$
 b. Peak-to-peak operating power, 10 Hz to 50 kHz, over 60 seconds.
 c. The monitor diode indicates the power out of the rear facet and is intended to be used as an approximate indicator of power out of the chip.

BL976-SAG300 Fiber Characteristics			
	Min	Typical	Max
Fiber Type	H11060 or Equivalent SM Fiber		
Protection Tubing Diameter	900 μm		
Mode Field Diameter ^a @ 980 nm	5.9 \pm 0.3 μm		
Numerical Aperture	0.14		
Fiber Coating Diameter	230 μm	250 μm	270 μm
FBG Coat Diameter	-	-	400 μm
Fiber Termination	FC/APC, 2.0 mm Narrow Key		
FP Gain Chip to FBG Distance ^b	1.9 m	2.0 m	2.1 m
Bend Radius	25 mm	-	-

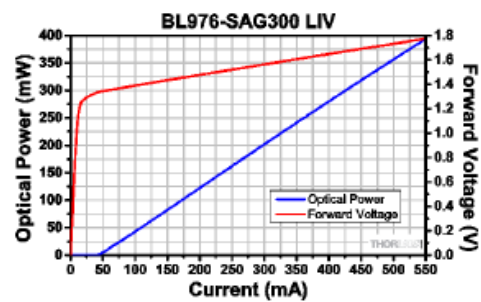
- a. Mode Field Diameter (MFD) is specified as a nominal value
b. To the center of the FBG, approximate location marked on outside of tubing

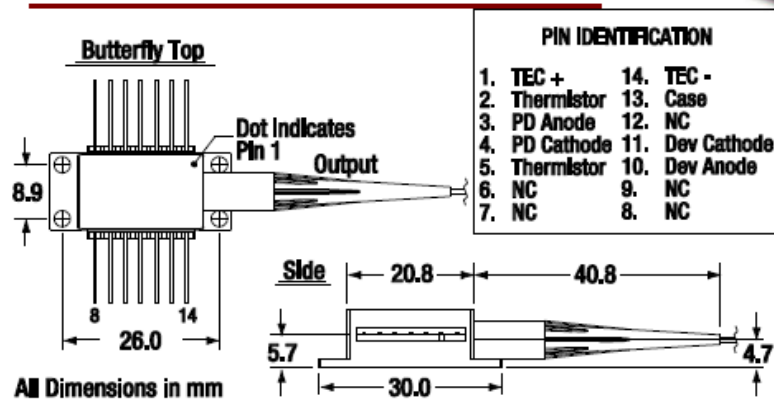
BL976-SAG300 TEC Characteristics				
	Symbol	Min	Typical	Max
TEC Current	I_{TEC}	-	-	1.4 A
TEC Voltage	V_{TEC}	-	-	2.1 V
Thermistor Resistance (@ 25 °C)	R_{TH}	9.5 k Ω	10 k Ω	10.5 k Ω

Typical Performance Plots



Measured using Thorlabs' OSA201



Drawing**Operation Notes and Warnings**

- 1) Always inspect and clean the fiber end face of the pigtail and mating fiber prior to mating. Damaged or scratched fibers will have to be re-polished or re-connectorized. The mating sleeve should also remain clean. It is recommended that mating be done only in a clean environment. Failure to properly clean this fiber can cause the fiber end face to become burned or otherwise damaged. Inspecting with the device powered on can cause injury and/or permanent blindness.
- 2) Always ensure this device is properly temperature regulated. Thorlabs' recommended mounts are CLD1015 or LM1452. Thermal paste or tape between the bottom surface of the butterfly package and the mount can improve thermal conductivity. Mounting screws should be used with appropriate torque.
- 3) Stress-induced birefringence in the fiber between the laser and the FBG will cause the polarization of the FBG-reflected light to change. For best performance, avoid manipulating the fiber over this region during use.
- 4) The monitor PD is intended to be used as a indicator of relative power and may change value if the coiled fiber is repositioned. For monitoring absolute power, a 1% fiber tap splitter (coupler) with separate PD should be used.
- 5) This product is not designed to be modulated. It is suggested to use an external switch such as a Pockels cell if a modulated output is desired.
- 6) If shortening the fiber length, be sure to leave the FBG which is marked on the outside of the fiber and tubing.
- 7) To protect the laser diode from damage due to static electricity (ESD), please follow proper ESD handling precautions.
- 8) This device emits coherent light from the connector end of the fiber and is classified as Class 3B when combined with other components. To ensure safe operation, use only with a suitable power source that complies with the requirements for laser systems, as specified in IEC-60825-1 "Safety of Laser Products."
- 9) Handle the module only by its package. Do not hold by the fiber pigtail.

6.2 Especificaciones del divisor en longitud de onda



980/1550 nm WDM/Tap Coupler /Isolator Hybrid Combination

AC Photonics' WTIH is a combination of a wavelength division multiplexer, tap coupler and an isolator in a compact package. This product has an extremely low insertion loss, a very stable tap-coupling ratio, high isolation, and high return loss. The WTIH is ideal for fiber optic amplifier applications. All AC Photonics' products are Telcordia qualification tested.



Features

- Wide Operating Wavelength Range
- Compact Size
- Low Insertion Loss
- High Channel Isolation
- Ultra Low PDL & PMD
- High Stability and Reliability
- Epoxy Free on Optical Path

Applications

- Fiberoptic Amplifiers
- CATV Fiberoptic Links
- WDM Systems
- Fiberoptic Instruments
- Transmitters and Fiber Lasers
- Laboratory R&D

Performance Specifications

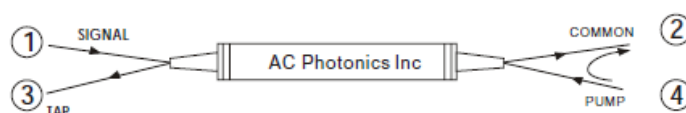
Parameter	Single Stage	Dual Stage
Signal Operation Wavelength Range (nm)	C band L band	1528~1564 1570~1605
Pump Channel Wavelength Range (nm)	965~1000	
Isolation (dB) (@ 23°C all SOP)	≥31	≥45
Isolation (dB) (2 to 4 @λ signal)	≥12	
Isolation (dB) (1 to 2 @λ pump)	≥30	
Insertion Loss (over wavelength range and 0 to +70°C, all SOP) (dB)	Pump Channel	≤0.6
	Signal Channel	≤1.3 ≤1.4
	Nominal Tap Ratio 1%	19.0~20.8
	Nominal Tap Ratio 2%	16.2~18.0
	Nominal Tap Ratio 5%	12.2~14.0
Wavelength Dependant Loss (dB)	≤0.5	
Return Loss (dB)	≥50	
Directivity (dB)	≥55	
PDL (dB)	≤0.1	
PMD (ps)(Low PMD Option)	≤0.25(0.05)	≤0.05
Power Handling (mW)	300	
Operating Temperature (°C)	0 ~+70	
Storage Temperature (°C)	-40 ~+85	
Dimensions (mm)	φ6.5 x L38	
Fiber Type	Corning HI 1060 fiber at common/pump port Corning SMF-28 fiber at signal/tap port	

Values are referenced without connector loss. Specifications may change without notice.

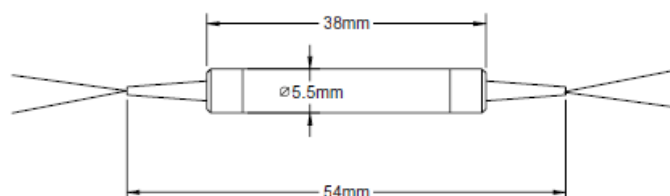


Ordering Information

WTIH	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	Wavelength	Stage	Tap Ratio	Pigtail Style	Fiber Length	In/Out Connector
	59=1550/980nm 69=1585/980nm	S=Single Stage U=Dual Stage	1=1% 2=2% 5=5%	1=Bare Fiber 2=900um Jacket	1=1.0m 2=1.5m	0=None 1=FC/APC 2=FC/PC 3=SC/APC 4=SC/PC 5=ST 6=LC



Dimensions



[Back to Product List](#)

6.3 Especificaciones de la fibra dopada con erbio



UK AND WORLDWIDE

Fibercore House
University Parkway
Southampton Science Park
Southampton
Hampshire
SO16 7QQ
UK

T: +44 (0)23 8076 9893
F: +44 (0)23 8076 5356
sales@fibercore.com

Certificate of Conformance

Customer: Universidad Publica de Navarra
Specification Number: rev:

Manufacturer	Fibercore Ltd.
Fibercore Part Number	I-25(980/125)
Customer Part Number	

Fiber Lot Number	32213B/B-01EM
Fiber Length (m)	10

Fiber Parameters:

Parameter	Units	Lower Spec Limit	Upper Spec Limit	Actual Value	P/F
Peak Absorption (nominally 1530 nm)	dB/m	35	45	41.38	P
Absorption @ 979 nm	dB/m			24.4	P
Attenuation @ 1200nm	dB/km		10	6.9	P
Coating Diameter	microns	238	252	239.5	P
Core Concentricity	microns		0.5	0.09	P
Cut-off Wavelength	nm	900	970	917	P
Fiber Diameter	microns	124	126	125.2	P
Mode Field Diameter	microns	5.3	6.3	5.7	P
Numerical Aperture		0.23	0.25	0.24	P
Operating Wavelength	nm		1550	1550	P
Proof test	%		1	1	P

Notes

980nm absorption calculated from 1530nm (peak) measured value

MFD is a calculated value

Composition

Erbium

Coating

Dual layer acrylate

Passed by:



Fibercore QA

Date: 05 October 2020

Fibercore Limited certifies, that the whole of the supplies detailed hereon conform in all respects to the Specification quoted above and order relative thereto and that the supplies have been inspected and tested in accordance with the conditions and requirements of the order (unless otherwise stated above).


For further information on your fiber, please contact your Fibercore Distributor quoting the fiber serial number.

6.4 Especificaciones del circulador óptico



Optical Network International

3-Port Polarization Insensitive Optical Circulator

Features	
Smallest Package Size	
High Isolation & High Return Loss	
Low Insertion Loss & PDL	
Application	
EDFA, DWDM and OTDR	
DWDM and OADM Networks	
Bi-directional Transmission System	

Specifications

Parameter	3 Port	
Operating Wavelength (λ_{op}) (nm)	1310+/-30 or 1550+/-30	1590+/-30 or 1610+/-30 or 1525~1610
Peak Isolation (dB)	52	50
Isolation (λ_c , 23°C all SOP) (dB)	≥40	≥40
Isolation (λ_{op} , T_{op} , SOP) (dB)	≥35	≥32
Insertion Loss (λ_{op} , 23°C all SOP) (dB)	≤0.8 (Typ. 0.6)	≤0.9 (Typ. 0.7)
PDL (dB)	≤0.2	
PMD (ps)	≤0.1	
Directivity (dB)	≥50	
Return Loss (dB)	≥50	
Power Handling (mW)	≤500	
Fiber Type	SMF-28e	
Operating Temperature (T_{op}) (°C)	0 ~ +70	
Storage Temperature (°C)	-40 ~ +85	
Dimensions (mm)	φ5.5×L50, 90×16×9	

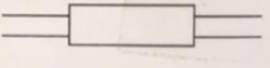
Package Dimension



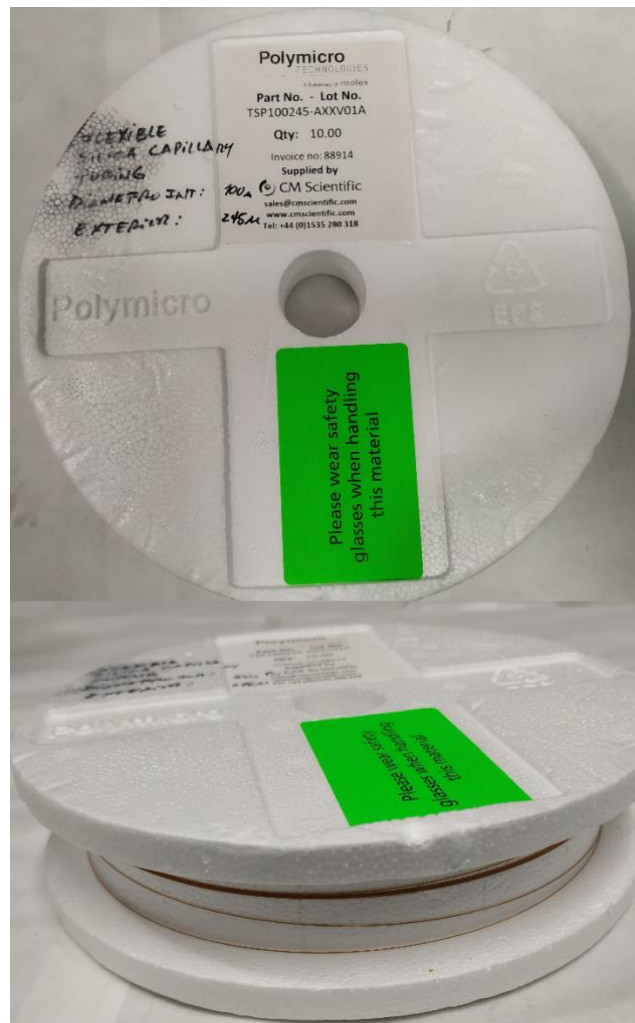
Ordering Information

[illegible]

6.5 Especificaciones del acoplador óptico 50:50

Optical Coupler Test Report - oeMarket.com			
P/N:SWB-1550-2x2-P-50/50-1-FA		S/N: A130126399	
Operate Wavelength:	1550±40nm		
Fiber Type:	SMF-28e fiber		
Splitting Ratio:	50:50		
Main Spec		IL(dB)	PDL (dB)
Port1(color red) → Port3(color black)		3.43	0.01
Port1(color red) → Port4(color blue)		3.51	0.02
Port2(color white) → Port3(color black)		3.54	0.02
Port2(color white) → Port4(color blue)		3.48	0.03
Connector Type		FC/APC	
Fiber Length		1m	
Return Loss(dB)	>55	Operating Temperature	-20℃ to + 70℃
Directivity(dB)	>55	Storage Temperature	-40℃ to + 85℃
*All data measured at central wavelength. RoHS compliant.			
Date:2 August 2013			

6.6 Especificaciones de la fibra de núcleo hueco



6.7 Especificaciones de la fibra de no-core

